Aus dem Veterinär-Physiologischen Institut der Universität Zürich
(Direktor: Prof. Dr. Dr. h.c. H. Spörri)

Untersuchung der Atmungsmechanik beim Schwein

INAUGURAL-DISSERTATION

zur Erlangung der Doktorwürde
der Veterinär-Medizinischen Fakultät
der Universität Zürich

vorgelegt von
RUDOLF PFISTER
von Uster (ZH)

Genehmigt auf Antrag von
Prof. Dr. Dr. h.c. H. Spörri, Referent
Prof. Dr. W. Leemann, Korreferent

1979

Juris Druck + Verlag Zürich
1978

Aus dem Veterinär-Physiologischen Institut der Universität Zürich
(Direktor: Prof. Dr. Dr. h.c. H. Spörri)

Untersuchung der Atmungsmechanik beim Schwein

INAUGURAL-DISSERTATION

zur Erlangung der Doktorwürde
der Veterinär-Medizinischen Fakultät
der Universität Zürich

vorgelegt von
RUDOLF PFISTER
von Uster (ZH)

Genehmigt auf Antrag von
Prof. Dr. Dr. h.c. H. Spörri, Referent
Prof. Dr. W. Leemann, Korreferent

Juris Druck + Verlag Zürich
1978

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

ISBN 3 260 04535 X

INHALTSVERZEICHNIS

1.	EINLEITUNG	7
2.	LITERATURUEBERSICHT	9
3.	PROBLEMSTELLUNG	13
4.	METHODIK	15
4.1.	Versuchstiere	15
4.2.	Durchführung der atmungsphysiologischen Untersuchungen	16
4.3.	Ergänzende Untersuchungen	17
4.4.	Analyse der Atmungskurven	17
4.5.	Datenerfassung und statistische Auswertung	24
5.	ERGEBNISSE	25
5.1.	Ventilationsgrössen	25
5.1.1.	Atmungsfrequenz	
5.1.2.	Atemzugvolumen	
5.1.3.	Atemminutenvolumen	
5.2.	Atemzeitquotient	29
5.3.	Atemstromstärke	34
5.3.1.	Maximale Atemstromstärke während der Inspiration	
5.3.2.	Maximale Atemstromstärke während der Exspiration	
5.3.3.	Mittlere Atemstromstärke während der Inspiration	
5.3.4.	Mittlere Atemstromstärke während der Exspiration	
5.4.	Interpleuraldruck	46
5.4.1.	Minimaler Interpleuraldruck während der Inspiration	
5.4.2.	Maximaler Interpleuraldruck während der Exspiration	
5.4.3.	Maximale Interpleuraldruckdifferenz	

5.5.	Dynamische Compliance	47
5.6.	Atmungsarbeit	49
5.6.1.	Atmungsarbeit während eines Atmungszyklus	
5.6.2.	Atmungsarbeit während der Inspiration	
5.6.3.	Atmungsarbeit während der Exspiration	
5.6.4.	Atmungsarbeit während einer Minute	
5.6.5.	Atmungsarbeit je Milliliter	
5.6.6.	Atmungsarbeit je inspiriertem Milliliter	
5.6.7.	Atmungsarbeit je exspiriertem Milliliter	
5.7.	Funktionelle Residualkapazität	54
5.8.	Helium - Einmischzeit	54
6.	DISKUSSION	61
6.1.	Ventilationsgrössen	61
6.2.	Atemzeitquotient	63
6.3.	Atemstromstärke	64
6.4.	Interpleuraldruck	65
6.5.	Compliance	66
6.6.	Atmungsarbeit	68
6.7.	Funktionelle Residualkapazität	69
7.	ZUSAMMENFASSUNG	71
8.	LITERATURVERZEICHNIS	73

Atmungsphysiologische Symbole und Masseinheiten

f	Atmungsfrequenz	min^{-1}
V_T	Atemzugvolumen	ml
AMV	theoretisches Atemminutenvolumen	l
t_I	Inspirationszeit	s
t_E	Exspirationszeit	s
AZQ	Atemzeitquotient	
$\dot{v}_{I\ max.}$	Maximale inspiratorische Atemstromstärke	ml/s
$\dot{v}_{E\ max.}$	Maximale exspiratorische Atemstromstärke	ml/s
$\bar{v}_I$	Mittlere inspiratorische Atemstromstärke	ml/s
$\bar{v}_E$	Mittlere exspiratorische Atemstromstärke	ml/s
$P_{Pl\ I\ min.}$	Minimaler inspiratorischer Interpleuraldruck = grösster Unterdruck während der Inspiration	mm Hg
$P_{Pl\ E\ max.}$	Maximaler exspiratorischer Interpleuraldruck = kleinster Unterdruck, bzw. grösster Ueberdruck während der Exspiration	mm Hg
$\Delta P_{Pl\ max.}$	grösste Interpleuraldruckamplitude	mm Hg
$C_{dyn.}$	dynamische Compliance	l/cm H_2O
A_{total}	Atmungsarbeit während eines Atmungszyklus	g·cm
A_I	Atmungsarbeit während der Inspiration	g·cm
A_E	Atmungsarbeit während der Exspiration	g·cm
A/min	Atmungsarbeit während einer Minute	g·cm/min
A/ml	Atmungsarbeit je Milliliter	g·cm/ml
A_I/ml	Atmungsarbeit je inspiriertem Milliliter	g·cm/ml
A_E/ml	Atmungsarbeit je exspiriertem Milliliter	g·cm/ml
FRK	Funktionelle Residualkapazität	ml

1. EINLEITUNG

Die Pneumologie hat in den letzten Jahren als Folge technischer Fortschritte eine Strukturwandlung durchgemacht. Die frühere Betrachtungsweise, die sich vorwiegend auf klinisches Bild und Pathologie stützte, wurde ergänzt durch die Analyse exakter Messungen der Lungenfunktion. Diese wird mit dem klinischen Bild in Beziehung gesetzt, womit das einzelne klinische Symptom eine weitere, nachprüfbare Wertigkeit erhält.

Auch in der Veterinärmedizin sind in den letzten Jahren durch die Einführung quantitativer Funktionsanalysen des Atmungsapparats grosse Fortschritte erzielt worden. Es war bis jetzt vor allem das Pferd, welches in bezug auf die Atmungsphysiologie das Interesse auf sich gelenkt hat. Im Zeitalter der Massentierhaltung, wo die frühzeitige Erkennung von Funktionsstörungen des Atmungsapparats erhebliche finanzielle Verluste verhindern kann (Keller 1973), ist aber auch einem Interesse an der Lungenfunktionsprüfung beim Schwein eine gewisse Bedeutung nicht abzusprechen. So bewiesen Häni et al. (1976), dass Erkrankungen des Respirationstrakts hochsignifikant mit Kümmern verbunden sind. Keller (1974) zeigte, dass Respirationskrankheiten die grössten wirtschaftlichen Schäden während der Mast verursachen. Nach einer Analyse des Sektionsguts 1971 bis 1973 (Material von 6628 Tieren) aus dem Institut für Tierpathologie der Universität Bern (Häni et al., 1976) sind 20% der Todesfälle und 30% der Nebenbefunde aus Schweinemastbetrieben auf Erkrankungen des Respirationstrakts zurückzuführen. Auch in einer Studie des Veterinary Investigation Service (1959) sind 20,4% der Todesfälle bei 2-4 Monate alten Tieren durch Respirationskrankheiten verursacht.

In der Untersuchung von Häni et al. (1976) stellt die Enzootische Pneumonie die häufigste Erkrankung des Respirationstrakts dar. Das akute Stadium der Enzootischen Pneumonie ist gekennzeichnet durch eine eitrige Bronchopneumonie mit Anfüllung der kleinen Bronchien und der Bronchioli terminales mit Leukozyten und Makrophagen. Als Folge einer bronchiolären Stenose tritt später das Bild eines

zentrilobulären Emphysems auf (Bertschinger et al., 1972; Dunne and Leman, 1975; Pattison, 1956; Wegmann et al., 1969). Damit treten bei der Enzootischen Pneumonie Veränderungen auf, die zur Gruppe der obstruktiven Lungenerkrankungen gehören und naturgemäss geeignet sind, durch eine physiologische Lungenfunktionsdiagnostik erfasst zu werden.

Prüfungen der Lungenfunktion sind also nicht nur von rein wissenschaftlichem Interesse, sondern sie tragen auch dazu bei, die klinische Diagnostik zu verfeinern und eventuelle Störungen der Atmungstätigkeit frühzeitig zu erkennen und damit bedeutende wirtschaftliche Schäden verhindern zu helfen.

Lungenfunktionsprüfungen sind ferner die Voraussetzung zur objektiven Prüfung von Medikamenten (Narkotika, Bronchospasmolytika usw.) und zur Beurteilung der Wirkung von Luftkontaminationen auf die Funktion der Atmungsorgane.

Nach Hörr (1973) hat unter den in der biomedizinischen Forschung verwendeten Haustieren in den vergangenen zwei Jahrzehnten kaum eine Tierart eine grössere Verwendung erlangt als das Schwein, vor allem, weil sich Mensch und Schwein in zahlreichen biologischen Merkmalen ähneln und sich experimentelle Resultate bei beiden Spezies wechselseitig übertragen lassen. Attinger and Cahill (1960) weisen auf die Ueberlegenheit des Schweines gegenüber dem Hund bei der Erforschung der Kreislauf- und Atmungsmechanik hin. Besonders hervorgehoben wird beim Schwein das Vorhandensein eines soliden Mediastinums als Vorteil für das Studium von Ventilationsmechanismen. Die Elastizität der Schweinelunge entspricht der bei der menschlichen Lunge.

Das Schwein spielt insbesondere eine grosse Rolle bei der Erforschung zahlreicher beim Menschen auftretender Krankheiten. So ist auch bei der Erforschung des Stress-Syndroms eine genaue Kenntnis der Kreislauf- und Respirationsparameter unerlässlich.

Die Interpretation von physiologischen und pathophysiologischen Untersuchungen des Respirationsapparats setzt die genaue Kenntnis der normalen Parameter voraus; es müssen also möglichst genaue Bezugsgrössen mit geringer physiologischer Streubreite ermittelt werden (Gretener, 1976).

2. LITERATURUEBERSICHT

Die ersten Versuche, die Gesetzmässigkeiten der Atembewegungen sowie die Zeitverhältnisse und umgewälzten Luftvolumina objektiv und quantitativ zu erfassen gehen bis ins letzte Jahrhundert zurück.

Exakte Untersuchungen der Gesetzmässigkeiten der Atmungsphasen wurden durch die Einführung der Pneumotachographie von Fleisch (1925, 1956) ermöglicht.

In der Veterinärmedizin erweckte vor allem das Pferd das Interesse der Atmungsphysiologen. Quantitative Funktionsanalysen des Atmungsapparats bei Pferden erlangten diagnostische Bedeutung (Denac, 1966, 1970, 1976; Furukawa, 1972; Gretener, 1975; Sasse, 1971; Spörri und Leemann, 1964; Spörri und Zerobin, 1964; Spörri und Denac, 1967; Wetli, 1972).

Beim Schwein wurden bis heute selten genaue Messungen der Atmungsgrössen vorgenommen. Ziemlich eingehend untersucht wurde die Atmungsfrequenz unter verschiedenen Bedingungen.

Schulze et al. (1963) weisen auf die Armut der Literatur an Atmungsuntersuchungen bei Schweinen hin. Sie bestimmten die Atemfrequenz für 12 Alters- beziehungsweise Geschlechtsgruppen. Sie geben für Ferkel im Alter von 8-28 Tagen eine Atmungsfrequenz von 36 /min an, bei Läufern und Jungebern im Alter von 6-12 Monaten betrug sie 18,9 /min. Bei ihren Untersuchungen war die Abhängigkeit der Atmungsfrequenz vom Alter und von der inneren Körpertemperatur statistisch gesichert. Bei Ferkeln fanden sie die höchsten Frequenzen und auch die grössten Streuungen um den Mittelwert.

Ingram (1964) bestimmte bei dreimonatigen Schweinen von 18-28 kg Körpergewicht ausser der Körpertemperatur auch die Herzschlag- und Atmungsfrequenz. Durch Auszählen der Flankenbewegungen ermittelte er eine Atmungsfrequenz von 12-18 /min bei Umgebungstemperaturen von -5 °C bis +30 °C. Er schloss daraus, dass in diesem Temperaturbereich die Umgebungstemperatur für die vom Tier gewählte Atmungsfrequenz eine geringe Rolle spielt und dass die individuellen Unterschiede stärker ins Gewicht fallen.

In einer anderen Untersuchung bestimmten Schulze et al. (1965) die Atmungs- und Pulsfrequenz sowie die Körpertemperatur vor und nach Bewegung der Schweine. Durch Zählung der costoabdominalen Atembewegungen kamen sie für Absatzferkel von 14-28 kg Körpergewicht auf einen Mittelwert und Standardabweichung der Atmungsfrequenz von 39 ± 10 /min. Bei Mastschweinen von 92-124 kg Körpergewicht betrug die Atmungsfrequenz 32 ± 6 /min. Sie beobachteten, dass sich bei der Gruppe der jungen Tiere bereits durch die Anwesenheit eines Menschen im Stall die Atmungs- und Pulsfrequenz erhöhte.

Hippel (1966) untersuchte Eber im Alter von 8 bis 35 Monaten mit Körpergewichten von 100 bis 300 Kilogramm. Er bestimmte die Atmungsfrequenz durch Auszählen der Flankenbewegungen und fand eine Beziehung zwischen dem Alter der Tiere und der Atmungsfrequenz. Für 90 kg schwere Eber stellte er eine mittlere Atmungsfrequenz von 29,0 /min fest.

Steinhardt und Studzinski (1967) unterstreichen die Bedeutung der Atmungsfrequenz für die Thermoregulation, geben aber keine physiologischen Normalwerte an.

Scheunert - Trautmann (1976) gibt Ruhewerte der Atmungsfrequenz bei 100 kg schweren Schweinen mit f = 10-25 / min an.

Kittler et al. (1977) beschreiben eine telemetrische Methode zur Bestimmung der Atmungsfrequenz mittels eines Thermistor-Fühlers und geben bei Sauen Werte von f= 9-22 /min an.

Einige Autoren führten Messungen des Atemzugvolumens und des Atemminutenvolumens durch. Morrison et al. (1967) ermittelten bei 90 kg schweren weiblichen Schweinen die Atmungsfrequenz f= 15/min, das Atemzugvolumen V_T= 0,79 l und das Atemminutenvolumen AMV= 12 l/min.

Auf die Notwendigkeit standardisierter Versuchsbedingungen weist Hörnicke (1969) hin. Bei 105-220 kg schweren Schweinen gibt er Ruhewerte für die Frequenz (f = 19,4 /min), das Atemzugvolumen (V_T = 1,066 l) und das Atemminutenvolumen (AMV = 19,98 l/min) an. In einem Vergleich adulter Individuen verschiedener Arten berechnet er Proportionalitäten verschiedener Kenngrössen des Atmungsapparats zum Körpergewicht.

Eingehende atmungsphysiologische Untersuchungen bei Schweinen führten Attinger und Cahill (1960) durch. Sie untersuchten 19 mit Nembutal anästhesierte Schweine mit 9-45 kg Körpergewicht und erhielten folgende Werte für die Atmungsparameter:

Atmungsfrequenz	$f = 24,5 \pm 2,3$ /min
Atemzugvolumen	$V_T = 286 \pm 25$ ml
Atemminutenvolumen	$AMV = 6,7 \pm 0,6$ l
Compliance	$C = 57 \pm 6,6$ ml/cm H_2O
Funktionelle Residualkapazität	FRK = 738 ml
spezifische FRK	= 33,2 ml/kg Körpergewicht

In einer vergleichenden Untersuchung der Atmung bei verschiedenen Tierarten massen Amoroso et al. (1964) bei einem jungen Schwein mit 17 kg Körpergewicht Mittelwerte und Extremwerte folgender Atmungsparameter:

Atmungsfrequenz	f = 61,7 /min	
Atemzugvolumen	V_T = 309 (196-389)	ml
Atemminutenvolumen	AMV = 19,1	l
Maximale Atemstromstärke während der Inspiration	$\dot{V}_{I\ max.}$ = 933 (817-1083)	ml/s
Maximale Atemstromstärke während der Exspiration	$\dot{V}_{E\ max.}$ = 1067 (850-1433)	ml/s

Georgiev (1975) sammelte bei Göttinger Miniaturschweinen die Ausatmungsluft in einem Douglas-Sack und bestimmte das Atemminutenvolumen, das Atemzugvolumen und die Atmungsfrequenz. Er gibt dafür folgende Werte an:

$f = 38 \pm 6$ /min $\quad V_T = 130 \pm 10$ ml $\quad AMV = 5,0 \pm 0,5$ l

Ebenfalls bei Göttinger Miniaturschweinen erhoben Denac et al. (1977) eine Reihe von Atmungsparametern. Ihre Versuchstiere hatten ein durchschnittliches Gewicht von 22,8 ± 6,2 Kilogramm. Die Tiere wurden ohne Medikation untersucht und wurden zur Immobilisation in eine Hängematte verbracht. Es werden folgende Atmungsparameter mit ihren Durchschnittswerten angegeben:

Atmungsfrequenz $f = 32,0 \pm 6,7$ /min
Atemzugvolumen $V_T = 0,166 \pm 0,053$ l
Atemminutenvolumen $AMV = 5,11 \pm 1,35$ l
Atemzeitquotient $AZQ = 1,04 \pm 0,18$
Dynamische Compliance der Lunge $C_{dyn} = 0,06 \pm 0,06$ l/cm H_2O
Minimaler Interpleuraldruck während der Inspiration
$P_{Pl\ I\ min.} = -12,0 \pm 4,1$ cm H_2O

Maximaler Interpleuraldruck während der Exspiration
$P_{Pl\ E\ max.} = +0,1 \pm 6,5$ cm H_2O
Maximale Interpleuraldruckdifferenz $\Delta P_{Pl\ max.} = 12,0 \pm 3,2$ cm H_2O

Die Autoren heben die gute Uebereinstimmung ihrer Resultate mit Messungen beim Menschen hervor. Eine Ausnahme macht in dieser Beziehung der Interpleuraldruck, weil während der Inspiration vergleichsweise grosse negative Werte gefunden wurden und während der Exspirationsphase oft ein Ueberdruck registriert wurde.

3. PROBLEMSTELLUNG

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit Lungenfunktionsprüfungen und der Untersuchung der Atmungsmechanik bei Schweinen.

Untersuchungen am Schwein verdienen im Rahmen vergleichend-physiologischer Erhebungen generell für die medizinischen Wissenschaften Beachtung. Eine frühzeitige Erfassung von Erkrankungen des Respirationsapparats könnte mithelfen, beträchtliche finanzielle Verluste zu verringern.

Wie in der Literaturübersicht bereits geschildert, wurden Lungenfunktionsprüfungen bei Schweinen bis heute nur selten durchgeführt.

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung sollte die Methodik für atmungsphysiologische Messungen beim Schwein erarbeitet werden. Ziel dieser Arbeit war die Ermittlung genauer Messwerte der Lungenfunktion und der Atmungsmechanik mit möglichst geringer physiologischer Streubreite unter standardisierten Untersuchungsbedingungen.

Durch eine Unterteilung der Versuchstiere in drei verschiedene Gewichtsgruppen sollte auch die Abhängigkeit gewisser Atmungsparameter von Gewicht und Alter der Tiere abgeklärt werden.

4. METHODIK

4.1. Versuchstiere

Als Versuchstiere dienten Veredelte Landschweine aus Spezifisch-Pathogen-Freien (SPF) Beständen, da von diesen Tieren erwartet werden darf, dass sie mindestens frei sind von wichtigen Respirationskrankheiten wie Enzootische Pneumonie, Hämophilus-Pleuro-Pneumonie und Rhinitis atrophicans (Keller, 1973).

Die Tiere wurden in drei verschiedene Gewichtsgruppen eingeteilt. Ueber Anzahl, Geschlecht und Gewicht der Tiere in den verschiedenen Gewichtsgruppen gibt Tabelle 1 Auskunft.

Tabelle 1

Gewicht, Anzahl und Geschlecht der Schweine in den drei untersuchten Gewichtsgruppen.

GEWICHTSGRUPPE	I	II	III
GEWICHT (kg)			
Mittelwert $\bar{x}$	22,0	68,7	97,8
Standardabweichung s	4,5	5,1	7,5
Variationsbreite	15-35	61-78	85-107
ANZAHL (n)	17	7	12
weiblich	9	5	10
männlich	2	--	--
männlich kastriert	6	2	2

Die Tiere der Gewichtsgruppe II erscheinen in der Gewichtsgruppe III nochmals, da sie nach einer Pause von vier bis acht Wochen und entsprechender Gewichtszunahme erneut untersucht wurden. Insgesamt wurden also 29 Tiere untersucht.

4.2. Durchführung der atmungsphysiologischen Untersuchungen

Die Schweine wurden vor Beginn der Versuche einige Tage in unseren Stallungen akklimatisiert. Die Tiere wurden im wachen, unsedierten Zustand und nüchtern untersucht. Alle Versuche erfolgten vormittags. Zur Ruhigstellung wurden die Tiere in eine Hängematte mit vier Beinöffnungen gelegt und die Beine locker zusammengefesselt. Bei den meisten Tieren trat wenige Minuten nach der Fixation in der Hängematte ein physischer und psychischer Ruhezustand ein.

Die Schweine trugen eine Kunststoffmaske, die über Ober- und Unterkiefer reichte und mit luftundurchlässigem Schaumstoff luftdicht abgeschlossen wurde. Ein Pneumotachograph nach Fleisch (1925,1956), Nr. 2, konnte vorn aufgesetzt werden.

Mit einem zwölfkanaligen Direktschreiber (1) wurden folgende Kurven registriert: Pneumotachogramm (PTG), Spirogramm (SPG, durch elektronische Integration des Pneumotachogramms (2)), inspiratorisches Atemzeitvolumen (AZV), Kapnogramm (CO_2-Konzentration der Atemluft gemessen nach dem Prinzip der Ultrarotabsorption) sowie die bipolaren EKG-Ableitungen nach Nehb-Spörri (Scheunert-Trautmann 1976).

Ein bis zwei Tage nach der ersten Untersuchung wurde der Versuch wiederholt und wieder einige Tage später eine dritte Untersuchung angeschlossen. Im Anschluss an die zweite spirometrische Untersuchung wurde mit der He-Methode die Funktionelle

(1) Mingograph 1600, Elema-Schönander, Stockholm
(2) Integrator der Firma Dr. Fenyves & Gut, Basel

Residualkapazität (FRK) und gleichzeitig die He-Einmischzeit bestimmt. Anschliessend an die dritte Untersuchung wurde bei den Tieren der Gewichtsklassen I und III eine Registrierung der Interpleuraldruckkurve (P_{Pl}) vorgenommen. Dabei wurde der Interpleuralspalt bei den kleinen Tieren (Gruppe I) eine handbreit hinter und über dem linken Olekranon, bei den grösseren Tieren mit entsprechend grösseren Abständen, punktiert. Auf diese Weise erfolgte die Punktion im 8.-10. Interkostalraum.

Die Methodik und Interpretation dieser Lungenfunktionstests bei Grosstieren und Miniaturschweinen wurde bereits eingehend beschrieben (Denac, 1966, 1970, 1976; Denac et al., 1977; Furukawa, 1972; Gretener, 1975; Sasse, 1971; Spörri und Leemann 1964; Spörri und Zerobin, 1964; Spörri und Denac, 1967).

4.3. Ergänzende Untersuchungen

- Alle Schweine wurden einer eingehenden klinischen Untersuchung unterzogen, um klinisch erkennbare Krankheiten auszuschliessen. Besondere Aufmerksamkeit wurde dabei den Respirations- und Kreislauforganen geschenkt.
- Allen Schweinen wurde durch Punktion einer Ohrvene Blut entnommen und der Blutstatus zu Beginn und am Ende einer Versuchsserie bestimmt.
- Vom grössten Teil der Tiere liegen pathologisch-anatomische und histologische Untersuchungsergebnisse der Lunge vor.

4.4. Analyse der Atmungskurven

Aus den registrierten Kurven wurden nur Atemzüge ausgewertet, die sowohl inspiratorisch als auch exspiratorisch das gleiche Volumen aufwiesen. Bei unterschiedlichen inspiratorischen und exspiratorischen Atmungsruhelagen liegen für die Inspiration und die Exspiration nicht dieselben Bedingungen vor in bezug auf das umgewälzte Luftvolumen, die Zeitwerte sind also nicht miteinander vergleichbar (Gretener 1975).

Bei der Kurvenanalyse fielen zwei Atmungstypen auf, die für die Atmung der Schweine typisch sein könnten:
1. Manche Schweine zeigten hin und wieder zu Beginn der Exspiration einen Atemstillstand bis zur doppelten Dauer einer normalen Exspirationszeit. Da der Interpleuraldruck in dieser Atmungsphase über den Atmosphärendruck stieg, ist anzunehmen, dass die Tiere bei geschlossener Glottis ausatmen (Versuch von Valsalva (Scheunert-Trautmann, 1976)) (siehe Abbildung 1).

2. Bei einigen Tieren trat in ziemlich regelmässigen Intervallen eine Inspiration von der zwei- bis dreifachen Grösse gegenüber dem sonstigen Inspirationsvolumen auf. Daran anschliessend folgte während kurzer Zeit eine äusserst oberflächliche Atmung (siehe Abbildung 2).

Diese beiden Atmungstypen wurden für die Auswertung nicht berücksichtigt, da sie bezüglich umgewälzten Luftvolumina und Zeitwerten von den sonst üblichen Atemzügen stark abweichen.

Für jeden einzelnen Atemzug wurde mittels des Spirogramms das Atemzugvolumen (V_T) gemessen. Das Pneumotachogramm diente zur Bestimmung der Inspirationszeit (t_I), der Exspirationszeit (t_E) und der maximalen Atemstromstärke während der Inspiration ($\dot{v}_{I\ max.}$) und der Exspiration ($\dot{v}_{E\ max.}$). Aus diesen Messwerten lassen sich die Atmungsfrequenz (f), das theoretische Atemminutenvolumen (AMV), der Atemzeitquotient (AZQ) und die mittleren Atemstromstärken während der Inspiration ($\bar{v}_I$) und der Exspiration ($\bar{v}_E$) nach folgenden Formeln berechnen:

Atmungsfrequenz $$f = \frac{1}{t_I + t_E}$$

Theoretisches Atemminutenvolumen $$AMV = f \cdot V_T$$

Atemzeitquotient $$AZQ = \frac{t_E}{t_I}$$

Mittlere Atemstromstärke während der Inspiration $\bar{v}_I = \frac{V_T}{t_I}$

Mittlere Atemstromstärke während der Exspiration $\bar{v}_E = \frac{V_T}{t_E}$

Aus der Helium-Verdünnungskurve wurde analog zu der von Denac (1976) für das Pferd beschriebenen Methode die Funktionelle Residualkapazität (FRK) bestimmt. Dabei wurde vom erhaltenen Wert das Totraumvolumen der Atmungsmaske und des Dreiweghahns subtrahiert. Die FRK wird also in dem Sinne verstanden, dass sie diejenige Luftmenge umfasst, die nach einer normalen Ausatmung im Respirationsapparat zurückbleibt (Comroe et al. 1968). Die FRK wurde bei allen Schweinen mindestens zweimal bestimmt und der Mittelwert aus den beiden Resultaten berechnet. Anhand der gleichen He-Verdünnungskurve wurde die Helium-Einmischzeit bestimmt.

Für die Auswertung der Intrathorakaldruckkurve (P_{Pl}) wurde ein elektronisches Rechengerät (1) verwendet. Mit einem Digitalisiergerät (2) wurde für jeden einzelnen Atemzug das Spirogramm und die Interpleuraldruckkurve in digitalisierter Form auf Lochstreifen gespeichert und mit Hilfe des elektronischen Rechners und einem eigens für diesen Zweck erstellten Rechenprogramm wurden folgende Parameter berechnet: Atemzugvolumen (V_T), Atmungsfrequenz (f), theoretisches Atemminutenvolumen (AMV), minimaler Intrathorakaldruck während der Inspiration ($P_{Pl\ I\ min.}$), maximaler Druck während der Exspiration ($P_{Pl\ E\ max.}$), maximale Druckdifferenz ($\Delta P_{Pl\ max.}$), visköse Atmungsarbeit während eines ganzen Atemzuges (A_{total}), visköse Arbeit während der Inspiration (A_I), visköse Arbeit während der Exspiration (A_E), viskose Arbeit während einer Minute ($A/min = A_{total} \cdot f$), viskose Arbeit je Milliliter ($A/ml = A_{total} / V_T$), visköse Arbeit je Milliliter inspiriert ($A_I/ml = A_I / V_T$) und die visköse Arbeit je Milliliter exspiriert ($A_E/ml = A_E / V_T$).

(1) General Automation Typ SPC-16/65, Firma General Automation, Glattzentrum

(2) DIGIGRID, Hersteller: G.Coradi AG, Zürich

Abbildung 1

Beispiel der registrierten Atmungskurven. Die Kurven bedeuten von oben nach unten: Spirogramm (SPG, aufsteigender Schenkel = Inspiration); Pneumotachogramm (PTG); Interpleuraldruckkurve (P_{Pl}); inspiratorisches Atemzeitvolumen (AZV); Kapnogramm (CO_2 - Konzentrationskurve); Elektrokardiogramme, Ableitungen nach Nehb-Spörri (EKG D, A, J).

Der dritte Atemzug von links und die darauf folgenden sind Atemzüge mit Atemstillstand zu Beginn der Exspiration und positivem Interpleuraldruck während dieser Phase.

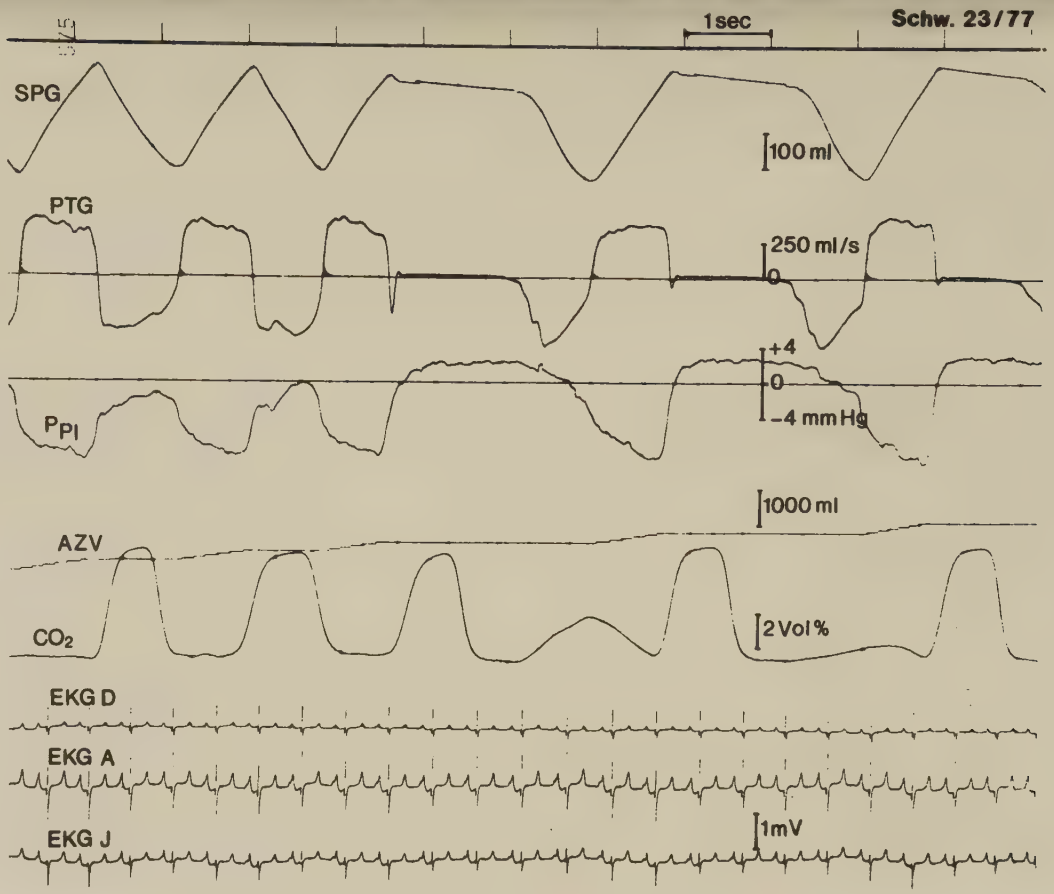

1sec
Schw. 23/77
SPG
100 ml
PTG
250 ml/s
0
+4
0
-4 mmHg
PPI
1000 ml
AZV
CO2
2 Vol %
EKG D
EKG A
EKG J
1mV

Abbildung 1

Abbildung 2

Die Kurven bedeuten von oben nach unten: Spirogramm (SPG, aufsteigender Schenkel = Inspiration), Pneumotachogramm (PTG), inspiratorisches Atemzeitvolumen (AZV) und Kapnogramm (CO_2).

Auf eine Inspiration von der zwei- bis dreifachen Grösse des normalen Inspirationsvolumens folgt eine Phase, wo die Luftverschiebungen einzig durch die Volumenänderungen im Brustraum infolge der Herzaktion verursacht werden (kleine Zacken im Pneumotachogramm und, zeitlich verschoben, im Kapnogramm).

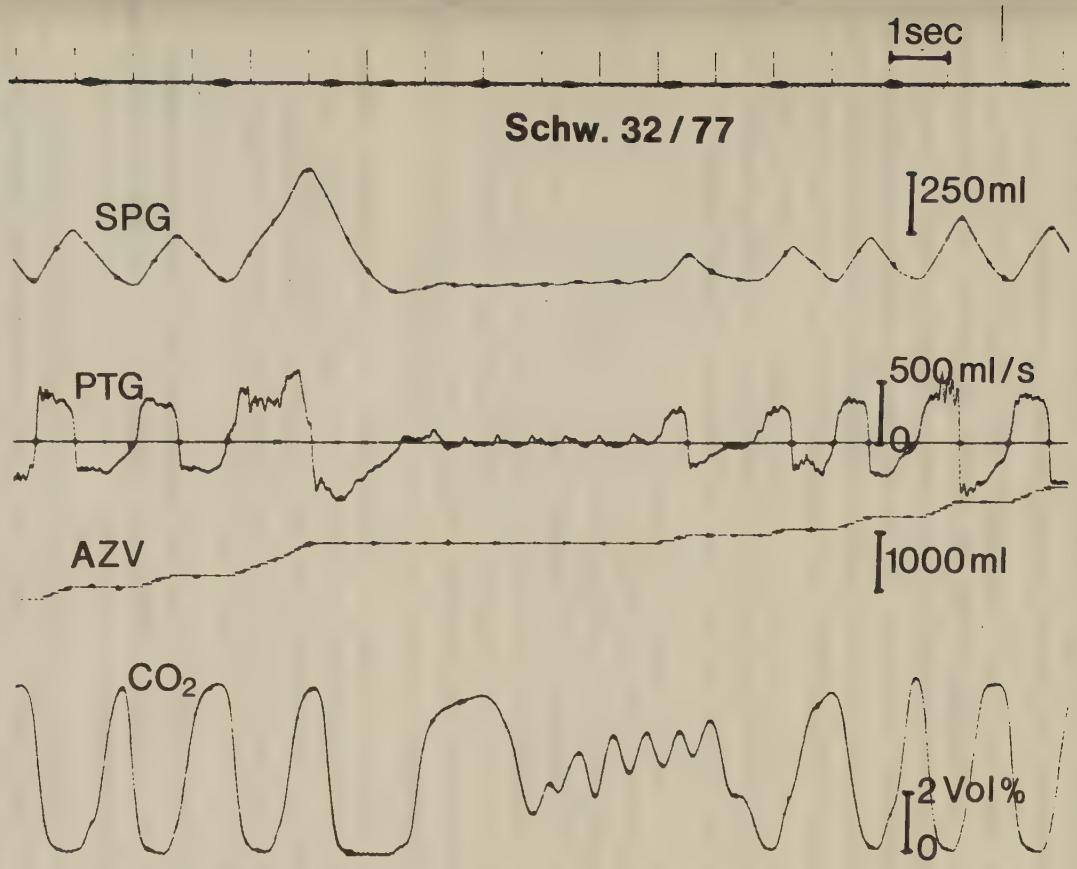


Abbildung 2

4.5. Datenerfassung und statistische Auswertung

Die untersuchten Atmungsgrössen werden als Normalwerte unter definierten Bedingungen angegeben. Mittelwerte, Standardabweichungen und Toleranzgrenzen werden beschrieben.

Zur Abklärung eines Gewöhnungseffekts wurde bei den Tieren der Gewichtsgruppe I die Atmungsfrequenzen bei drei aufeinanderfolgenden Untersuchungen beschrieben. Dabei wurden die Aenderungen der Mittelwerte und Standardabweichungen der wiederholten Messungen am gleichen Tier mit einem Vorzeichentest geprüft. Aufgrund der signifikanten Abnahme der Frequenz-Mittelwerte ($P = 0,05$) der zweiten und dritten gegenüber der ersten Untersuchung wurden Messungen zur Beschreibung von Normalwerten aus der zweiten und dritten Untersuchung berücksichtigt.

Für die Gewichtsgruppe I standen 16 Tiere und für die Gewichtsgruppe II 6 Tiere aus der zweiten Untersuchung, für die Gewichtsgruppe III 12 Schweine aus der dritten Untersuchung mit je neun zufällig ausgewählten Atemzügen zur Verfügung. Für die Auswertung der Interpleuraldruckkurven wurden in der Gewichtsgruppe I von 17 Tieren je fünf Atemzüge, in der Gewichtsgruppe III je drei Atemzüge von elf Schweinen berücksichtigt. Wegen Unvollständigkeit der Messungen schieden drei Tiere teilweise aus.

Für die Beschreibung von Normalwerten der Atmungsgrössen wurden 95% - Toleranzgrenzen einerseits für Messungen innerhalb der Tiere und andererseits für die mittleren Messwerte zwischen den Tieren einer Gewichtsgruppe berechnet (Documenta Geigy, 1968, 7. Aufl., S. 44, 155-156).

Für einen Teil der Atmungsgrössen wurde die Abhängigkeit gegenüber der Atmungsfrequenz, dem Atemzugvolumen und dem theoretischen Atemminutenvolumen untersucht.

Die Rechenarbeiten wurden am Rechenzentrum der Universität Zürich durchgeführt. Die Daten jedes ausgemessenen Atemzuges wurden auf Lochkarten abgelocht und unter Anwendung von BMDP-Programmen (Dixon, 1975) statistisch ausgewertet.

5. ERGEBNISSE

Im Folgenden sollen die Ergebnisse der Messungen der verschiedenen Atmungsparameter angegeben werden. Es handelt sich dabei um den Durchschnitt aus den Mittelwerten von je neun Messungen pro Tier einer Gruppe. Bei den Gewichtsgruppen I und II stammen die Messungen aus der zweiten Untersuchung, bei der Gewichtsgruppe III aus der dritten. Für die Ergebnisse der Interpleuralpunktion standen bei der Gewichtsgruppe I fünf Messungen je Tier zur Verfügung, bei der Gewichtsgruppe III drei.
Die Resultate werden als Mittelwert ($\bar{x}$) und Standardabweichung (s) für jede Gewichtsgruppe angegeben. Die 95% - Toleranzgrenzen werden ebenfalls aufgeführt (Tabellen 2 - 5, Abbildung 15).

Der Toleranzbereich für die mittleren Messwerte zwischen den Tieren einer Gewichtsgruppe ist etwas kleiner als der gesamte Bereich der Toleranzgrenzen für Messungen innerhalb der Tiere. Es bestehen wesentliche individuelle Unterschiede bei der einzelnen Atmungsgrösse (Abbildungen 3 - 5).

5.1. Ventilationsgrössen

5.1.1. Atmungsfrequenz

Die Berechnung der Atmungsfrequenz (f) ergab folgende Werte (siehe Tabelle 2):

Gewichtsgruppe	I	$f = 32{,}2 \pm 6{,}4$ /min	($\bar{x} \pm s$)
Gewichtsgruppe	II	$f = 21{,}8 \pm 2{,}8$ /min	
Gewichtsgruppe	III	$f = 26{,}0 \pm 8{,}6$ /min	

Der Mittelwert der Gruppe der kleinen Schweine liegt etwas höher als bei den grösseren Tieren, die Toleranzbereiche der kleinsten und grössten Tiere überdecken sich praktisch ganz, der Toleranzbereich der Gruppe II liegt in der unteren Hälfte der beiden andern Toleranzbereiche (Abbildung 15).

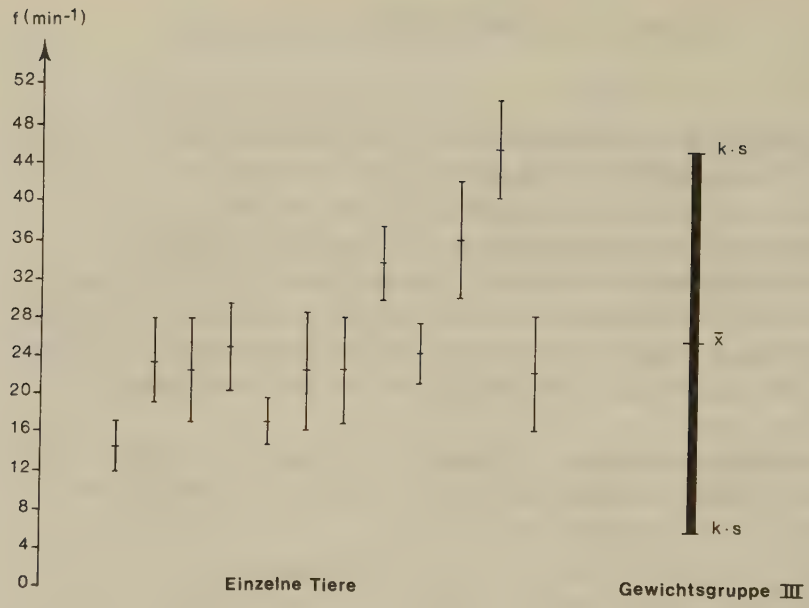


Abbildung 3

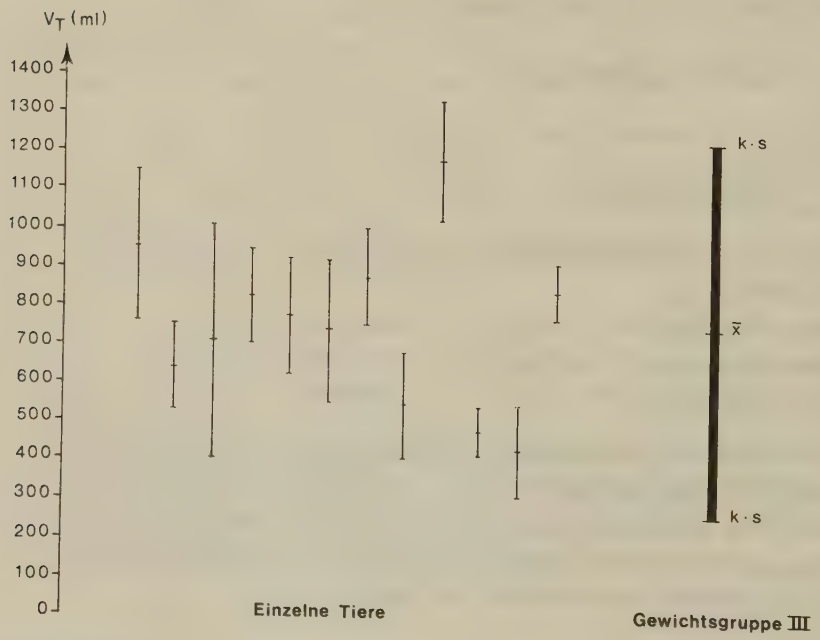


Abbildung 4

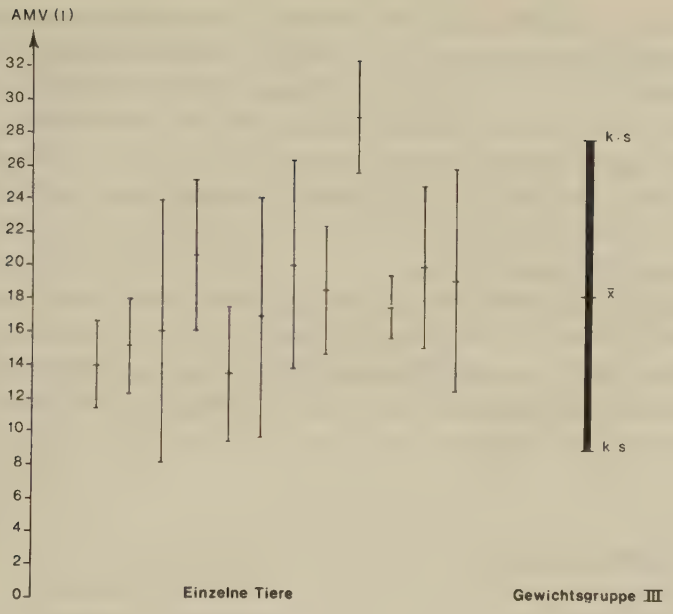


Abbildung 5

Abbildungen 3 - 5

Mittelwerte ($\bar{x}$) und 95% - Toleranzgrenzen (k·s) von je neun Messungen der Atmungsfrequenz (f), des Atemzugvolumens (V_T) und des theoretischen Atemminutenvolumens (AMV) bei den einzelnen Tieren der Gewichtsgruppe III. Der dicke Balken stellt den Mittelwert und Toleranzbereich aus den Mittelwerten der 12 Tiere der Gruppe III dar.

Die Werte der Atmungsfrequenz während der Interpleuralpunktion betragen für die Gewichtsgruppe I 34,0 ± 8,5 /min und für die grossen Tiere 26,6 ± 11,0 /min. Sie liegen bemerkenswert nahe bei den Mittelwerten der zweiten, resp. dritten Untersuchung, bei der die Tiere ausser der Immobilisation nicht noch durch weitere Manipulationen irritiert wurden. Dieser Umstand lässt auch für die Ergebnisse der Interpleuralpunktion einigermassen physiologische Normalwerte erwarten.
Die allgemein etwas hohen Frequenzwerte lassen sich durch die Art der Immobilisation der Tiere erklären. Auch die Auswahl der Atemzüge trägt zu einer Erhöhung der mittleren Atmungsfrequenzen bei, da die langsamen Atemzüge mit exspiratorischem Atemstillstand eliminiert wurden.

5.1.2. Atemzugvolumen

Für die Atemzugvolumina (V_T) wurden folgende Werte gefunden:

Gewichtsgruppe I	$V_T = 246 \pm 64$ ml	($\bar{x} \pm s$)
Gewichtsgruppe II	$V_T = 627 \pm 81$ ml	
Gewichtsgruppe III	$V_T = 755 \pm 210$ ml	

Mit zunehmendem Gewicht und Grösse der Tiere nimmt das Atemzugvolumen deutlich zu. Auffallend ist die grosse Streuung von V_T bei den schlachtreifen Tieren. Diese dürfte mit der grossen Streuung bei den Atmungsfrequenzen zusammenhängen und ebenso wie diese zum Teil Ausdruck psychischer Erregung sein. Die Werte für das Atemzugvolumen während der Interpleuralpunktion stimmen mit $V_T = 232 \pm 49$ ml bei der Gewichtsgruppe I und $V_T = 756 \pm 171$ ml bei der Gewichtsgruppe III bis auf wenige Milliliter mit den obigen Werten überein.

5.1.3. Atemminutenvolumen

Die Berechnung des theoretischen Atemminutenvolumens als Produkt aus der Atmungsfrequenz und dem Atemzugvolumen ($AMV = f \cdot V_T$) ergab folgende Resultate:

Gewichtsgruppe I AMV = 7,7 ± 1,9 l ($\bar{x} \pm s$)
Gewichtsgruppe II AMV = 13,8 ± 3,0 l
Gewichtsgruppe III AMV = 18,5 ± 4,1 l

Die Ergebnisse während der Interpleuralpunktion liegen mit AMV = 7,8 ± 2,1 l (Gewichtsgruppe I) und AMV = 18,7 ± 4,1 (Gruppe III) nicht höher.
Die Toleranzgrenzen für die drei Gewichtsgruppen überdecken sich in einem grossen Bereich, wobei die Werte für die Jagerschweine doch etwas tiefer liegen (Abbildung 15).
Die Werte des theoretischen Atemminutenvolumens dürften aus den gleichen Gründen, die schon bei der Atmungsfrequenz angeführt wurden, etwas höher liegen als bei Tieren, die völlig unbeeinflusst sind.

5.2. Atemzeitquotient

Der Atemzeitquotient ist der Quotient aus der Exspirationszeit über der Inspirationszeit (AZQ = t_E / t_I).
Sein Mittelwert beträgt (Tabelle 2):

Gewichtsgruppe I AZQ = 1,15 ± 0,18 ($\bar{x} \pm s$)
Gewichtsgruppe II AZQ = 1,01 ± 0,10
Gewichtsgruppe III AZQ = 1,06 ± 0,13

Die Ausatmungsphase dauert im Durchschnitt etwas länger als die Einatmungsphase, wobei eine ziemlich grosse Streuung vom Mittelwert zu beobachten ist. Der grösste Toleranzbereich (Gruppe I) erstreckt sich von 0,75 bis 1,55.

Eine geringgradige Abhängigkeit des AZQ gegenüber der Atmungsfrequenz besteht innerhalb der einzelnen Gewichtsgruppen. Mit zunehmender Atmungsfrequenz nimmt der AZQ etwas ab. Werden aber die AZQ von der Tieren aller Gewichtsgruppen den zugehörigen Atmungsfrequenzen gegenübergestellt, kann keinerlei Beziehung festgestellt werden.

Mit zunehmendem Atemzugvolumen nimmt der Atemzeitquotient in der Gewichtsgruppe I und bei der Betrachtung aller Gruppen gesamthaft etwas ab, nicht aber innerhalb der Gewichtsgruppen II und III. In allen drei Gewichtsgruppen besteht eine Beziehung zum theoretischen Atemminutenvolumen, das heisst, mit steigendem AMV wird der AZQ kleiner.

Die Abhängigkeit des Atemzeitquotienten von allen untersuchten Variablen ist nicht linear. Die Korrelationen sind nicht eng (Abbildungen 6 - 8).

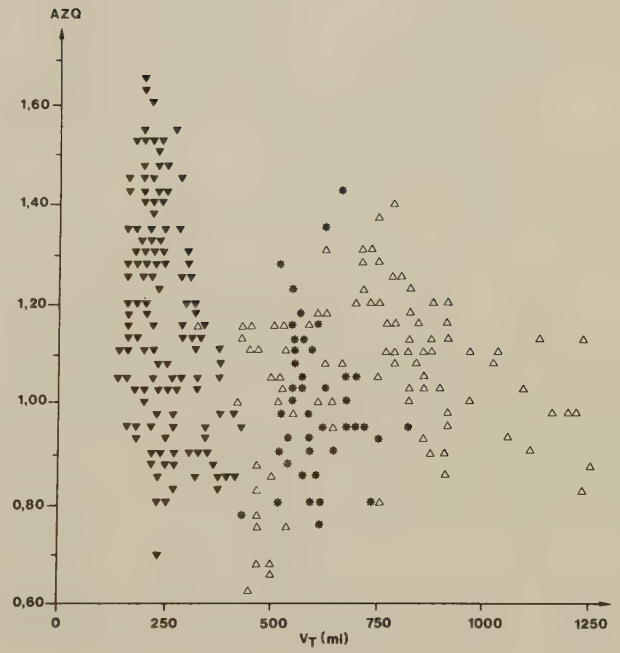


Abbildung 7

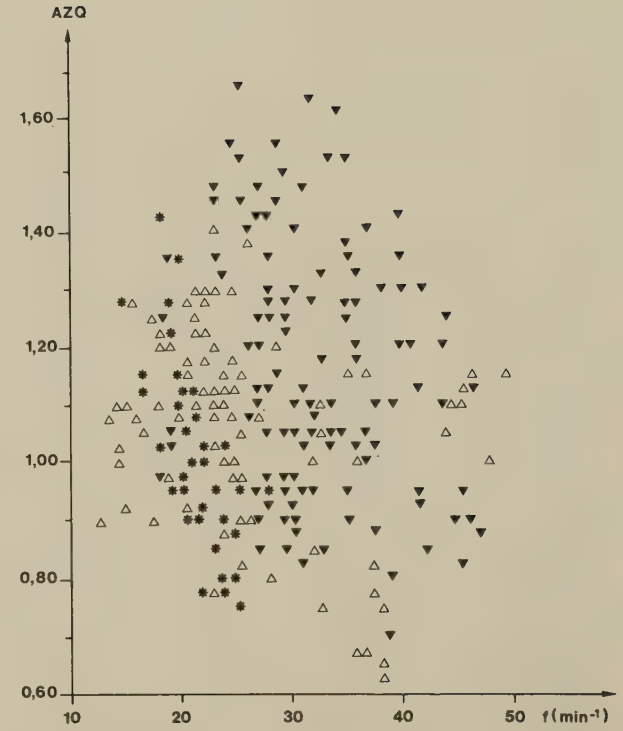


Abbildung 6

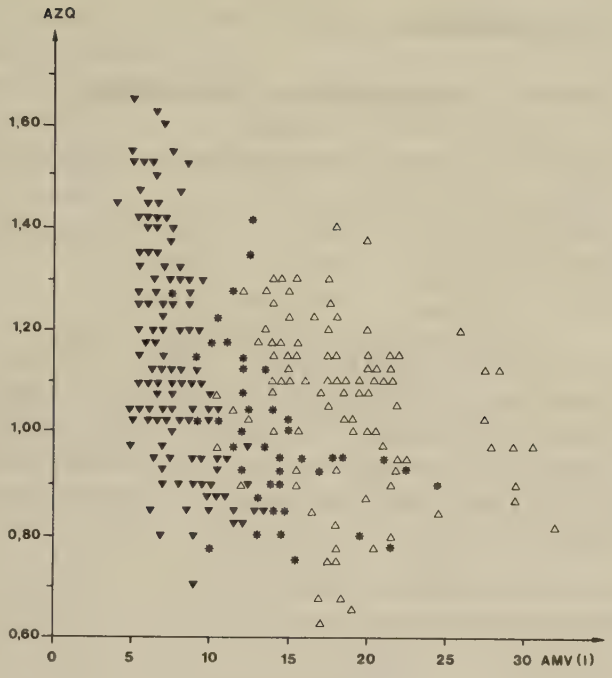


Abbildung 8

Abbildungen 6 - 8

Atemzeitquotient (AZQ) in Abhängigkeit von der Atmungsfrequenz (f), vom Atemzugvolumen (V_T) und vom theoretischen Atemminutenvolumen (AMV).

▼ = Gewichtsgruppe I Anzahl Messungen n = 144
✱ = Gewichtsgruppe II n = 54
△ = Gewichtsgruppe III n = 108

5.3. Atemstromstärke

5.3.1. Maximale inspiratorische Atemstromstärke

Die maximale beobachtete Atemstromstärke während der Inspiration beträgt:

Gewichtsklasse I $\dot{V}_{I\ max.}$ = 323 ± 54 ml/s ($\bar{x} \pm s$)
Gewichtsklasse II $\dot{V}_{I\ max.}$ = 512 ± 110 ml/s
Gewichtsklasse III $\dot{V}_{I\ max.}$ = 754 ± 161 ml/s

Die maximale inspiratorische Atemstromstärke nimmt mit steigendem Gewicht der Tiere deutlich zu (Abbildung 15).Für diesen Atmungsparameter wurde die lineare Abhängigkeit gegenüber der Atmungsfrequenz, dem Atemzugvolumen und dem theoretischen Atemminutenvolumen geprüft, wobei Regressionsgeraden mit folgenden Gleichungen gefunden wurden:

- Abhängigkeit der maximalen inspiratorischen Atemstromstärke von der Atmungsfrequenz

  Gewichtsgruppe I $y = 215{,}13 + 3{,}343\ x$ $r = 0{,}372$
  Gewichtsgruppe II $y = -122{,}24 + 29{,}162\ x$ $r = 0{,}691$
  Gewichtsgruppe III $y = 605{,}72 + 5{,}696\ x$ $r = 0{,}280$

- Abhängigkeit der maximalen inspiratorischen Atemstromstärke vom Atemzugvolumen

  Gewichtsgruppe I $y = 205{,}98 + 0{,}475\ x$ $r = 0{,}514$
  Gewichtsgruppe II $y = -189{,}1 + 1{,}119\ x$ $r = 0{,}835$
  Gewichtsgruppe III $y = 507{,}93 + 0{,}326\ x$ $r = 0{,}398$

- Abhängigkeit der maximalen inspiratorischen Atemstromstärke vom theoretischen Atemminutenvolumen

  Gewichtsgruppe I $y = 120{,}23 + 26{,}288\ x$ $r = 0{,}862$
  Gewichtsgruppe II $y = 49{,}505 + 33{,}619\ x$ $r = 0{,}919$
  Gewichtsgruppe III $y = 127{,}88 + 33{,}887\ x$ $r = 0{,}875$

Aus den Korrelationskoeffizienten (r) ist ersichtlich, dass die maximale inspiratorische Atemstromstärke statistisch gesichert von der Atmungsfrequenz, aber auch vom Atemzugvolumen abhängig ist. Darum erstaunt es nicht, dass zwischen $\dot{V}_{I\ max.}$ und dem Produkt aus der Atmungsfrequenz (f) und dem Atemzugvolumen (V_T),

nämlich dem theoretischen Atemminutenvolumen (AMV), die engste Korrelation besteht.
Die Regressionsgerade für die Abhängigkeit der beiden Variablen $\dot{V}_{I\ max.}$ und AMV hat bei allen drei Gewichtsgruppen etwa dieselbe Lage und Steigung (Abbildung 9).
Im Mittel nimmt die $\dot{V}_{I\ max.}$ bei einer Zunahme des AMV um 10 l etwa um 350 ml/s zu.

5.3.2. Maximale exspiratorische Atemstromstärke

Die maximale exspiratorische Atemstromstärke ($\dot{V}_{E\ max.}$) hat folgende Mittelwerte:

Gewichtsgruppe I $\dot{V}_{E\ max.} = 339 \pm 95$ ml/s ($\bar{x} \pm s$)
Gewichtsgruppe II $\dot{V}_{E\ max.} = 626 \pm 178$ ml/s
Gewichtsgruppe III $\dot{V}_{E\ max.} = 850 \pm 241$ ml/s

Auch bei diesem Atmungsparameter trifft die erwartete Vergrösserung mit zunehmendem Gewicht der Tiere ein.
Die Gleichungen der Regressionsgeraden und die Korrelationskoeffizienten sind:

- Abhängigkeit von der Atmungsfrequenz

  Gewichtsgruppe I $y = 211{,}75 + 3{,}951\ x$ $r = 0{,}268$
  Gewichtsgruppe II $y = -502{,}74 + 51{,}873\ x$ $r = 0{,}791$
  Gewichtsgruppe III $y = 663{,}09 + 7{,}171\ x$ $r = 0{,}234$

- Abhängigkeit vom Atemzugvolumen

  Gewichtsgruppe I $y = 95{,}54 + 0{,}990\ x$ $r = 0{,}653$
  Gewichtsgruppe II $y = -379{,}29 + 1{,}603\ x$ $r = 0{,}770$
  Gewichtsgruppe III $y = 437{,}40 + 0{,}546\ x$ $r = 0{,}442$

- Abhängigkeit vom theoretischen Atemminutenvolumen

  Gewichtsgruppe I $y = -16{,}282 + 46{,}115\ x$ $r = 0{,}922$
  Gewichtsgruppe II $y = -103{,}27 + 52{,}969\ x$ $r = 0{,}933$
  Gewichtsgruppe III $y = -97{,}538 + 51{,}273\ x$ $r = 0{,}877$

Abbildung 9

Verlauf der Regressionsgeraden, berechnet aus der maximalen inspiratorischen ($\dot{v}_{I\ max.}$) und exspiratorischen ($\dot{v}_{E\ max.}$) Atemstromstärke und dem theoretischen Atemminutenvolumen (AMV) bei den drei Gewichtsgruppen. Die Linien sind im Toleranzbereich ausgezogen.

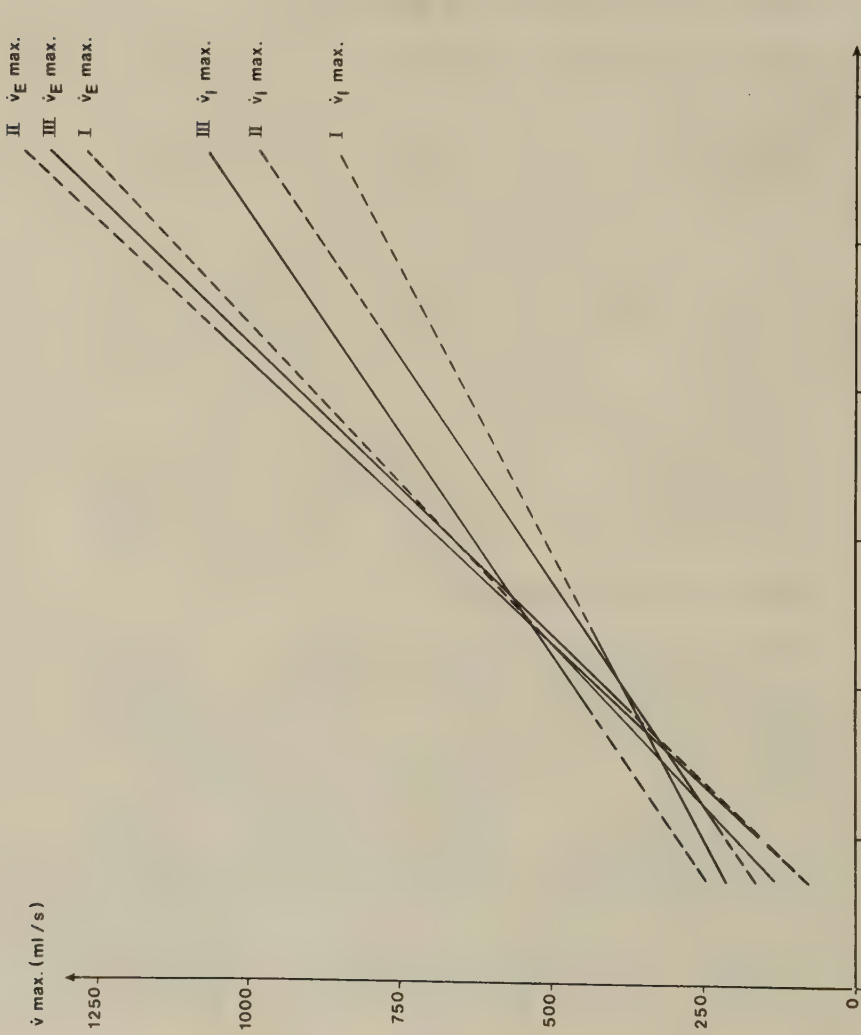


Abbildung 9

Die maximale Atemstromstärke während der Exspiration zeigt eine enge Abhängigkeit vom theoretischen Atemminutenvolumen, da sie mit zunehmender Atmungsfrequenz und zunehmendem Atemminutenvolumen grösser wird.
Die Regressionsgeraden, errechnet aus dem AMV und $\dot{V}_{E\ max.}$ der drei Gewichtsgruppen, unterscheiden sich praktisch nicht voneinander (Abbildung 9).
Die maximalen Stromstärken während der Inspiration und der Exspiration haben bei einem theoretischen Atemminutenvolumen von 5 - 15 Litern dieselbe Lage, die maximale exspiratorische Atemstromstärke steigt mit zunehmendem AMV stärker an als die inspiratorische (Abbildung 9).

5.3.3. Mittlere inspiratorische Atemstromstärke

Die mittlere inspiratorische Atemstromstärke ($\bar{v}_I = V_T / t_I$) hat folgende Mittelwerte (Abbildung 15):

Gewichtsgruppe I $\bar{v}_I = 272 \pm 54$ ml/s ($\bar{x} \pm s$)
Gewichtsgruppe II $\bar{v}_I = 455 \pm 87$ ml/s
Gewichtsgruppe III $\bar{v}_I = 630 \pm 130$ ml/s

Die Abhängigkeit der $\bar{v}_I$ von f, V_T und AMV lassen sich durch folgende Gleichungen ausdrücken:

- Abhängigkeit von der Atmungsfrequenz f

Gewichtsgruppe I $y = 194{,}58 + 2{,}393\ x$ $r = 0{,}278$
Gewichtsgruppe II $y = -56{,}36 + 23{,}500\ x$ $r = 0{,}704$
Gewichtsgruppe III $y = 519{,}95 + 4{,}226\ x$ $r = 0{,}247$

- Abhängigkeit vom Atemzugvolumen V_T

Gewichtsgruppe I $y = 133{,}98 + 0{,}560\ x$ $r = 0{,}633$
Gewichtsgruppe II $y = -146{,}64 + 0{,}960\ x$ $r = 0{,}906$
Gewichtsgruppe III $y = 379{,}14 + 0{,}332\ x$ $r = 0{,}481$

- Abhängigkeit vom theoretischen Atemminutenvolumen AMV

Gewichtsgruppe I	$y = 66{,}763 + 26{,}594\ x$	$r = 0{,}911$
Gewichtsgruppe II	$y = 70{,}497 + 27{,}930\ x$	$r = 0{,}966$
Gewichtsgruppe III	$y = 59{,}909 + 30{,}853\ x$	$r = 0{,}944$

Die Abhängigkeit der $\bar{v}_I$ von der Atmungsfrequenz, dem Atemzugvolumen und dem theoretischen Atemminutenvolumen ist signifikant oder hochsignifikant, wobei wiederum mit dem theoretischen Atemminutenvolumen die engste Korrelation besteht.
Die Lage und Steigung der Regressionsgeraden, errechnet aus der $\bar{v}_I$ in Abhängigkeit vom AMV, sind bei allen Gewichtsgruppen ähnlich (Abbildung 10).
Die $\bar{v}_I$ steigt bei einer Zunahme des AMV von 10 Litern um 300 ml/s, also etwas weniger als die maximale inspiratorische Atemstromstärke.

5.3.4. Mittlere exspiratorische Atemstromstärke

Für die mittlere Atemstromstärke während der Exspiration ($v_E = V_T / t_E$) wurden folgende Mittelwerte berechnet (Abbildung 15):

Gewichtsgruppe I	$\bar{v}_E = 247 \pm 76$	ml/s $(\bar{x} \pm s)$
Gewichtsgruppe II	$\bar{v}_E = 467 \pm 117$	ml/s
Gewichtsgruppe III	$\bar{v}_E = 609 \pm 156$	ml/s

Die Gleichungen für die Regressionsgeraden lauten:

- Abhängigkeit von f

Gewichtsgruppe I	$y = 134{,}40 + 3{,}490\ x$	$r = 0{,}295$
Gewichtsgruppe II	$y = -379{,}57 + 38{,}925\ x$	$r = 0{,}850$
Gewichtsgruppe III	$y = 426{,}19 + 7{,}020\ x$	$r = 0{,}359$

- Abhängigkeit von V_T

Gewichtsgruppe I	$y = 42{,}504 + 0{,}831\ x$	$r = 0{,}682$
Gewichtsgruppe II	$y = -269{,}12 + 1{,}175\ x$	$r = 0{,}808$
Gewichtsgruppe III	$y = 374{,}44 + 0{,}310\ x$	$r = 0{,}394$

- Abhängigkeit vom AMV

Gewichtsgruppe I	$y = -54{,}810 + 39{,}147\ x$	$r = 0{,}975$
Gewichtsgruppe II	$y = -68{,}341 + 38{,}913\ x$	$r = 0{,}981$
Gewichtsgruppe III	$y = -47{,}329 + 35{,}517\ x$	$r = 0{,}952$

Die mittlere exspiratorische Atemstromstärke ist von der Atmungsfrequenz und vom Atemzugvolumen abhängig,und zwar statistisch hochsignifikant gesichert.
Die engste Korrelation besteht mit dem theoretischen Atemminutenvolumen, da in diesem Parameter die beiden erwähnten Atmungsgrössen enthalten sind (Abbildungen 12 - 14).
Die Abhängigkeit vom AMV ist in allen untersuchten Gewichtsgruppen sehr ähnlich. Bei einer Zunahme des AMV um 10 Liter nimmt die $\bar{v}_E$ um etwa 375 ml/s zu, die Regressionsgerade ist also etwas steiler als bei der mittleren inspiratorischen Atemstromstärke (Abbildung 11).

Abbildung 10

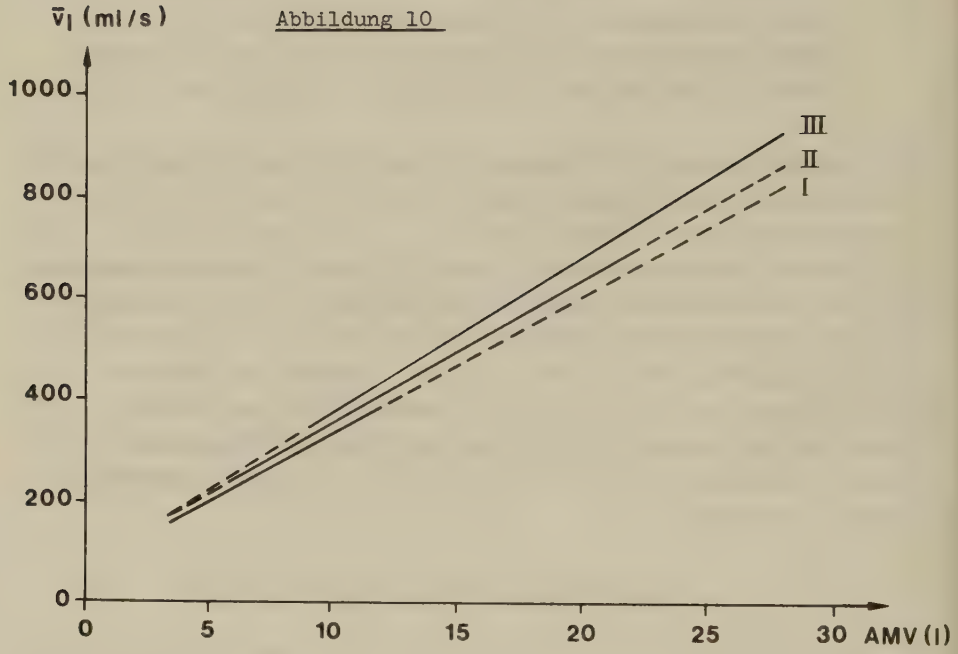


Abbildung 11

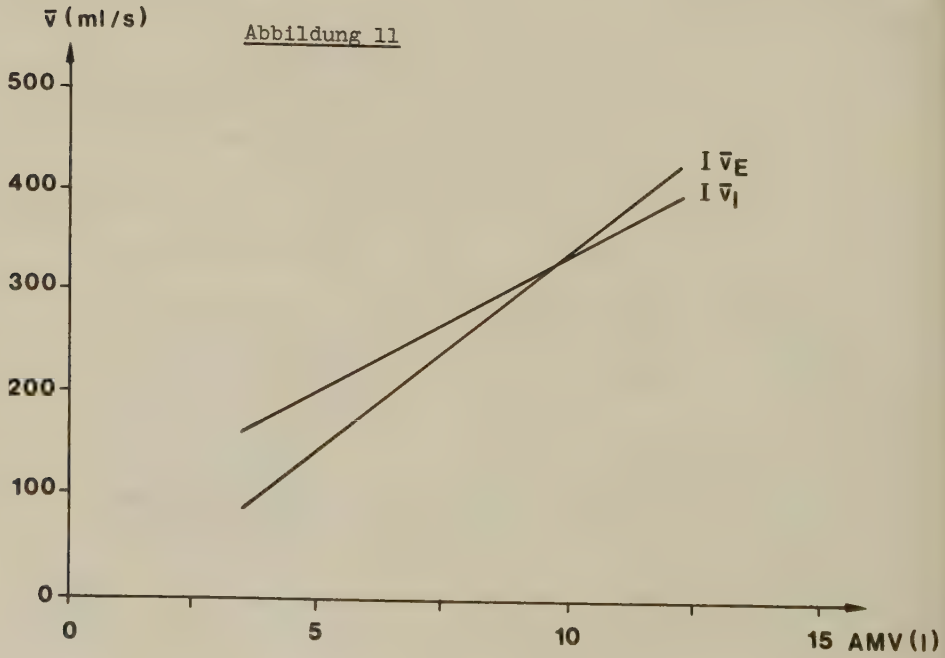


Abbildung 10

Verlauf der mittleren Atemstromstärke während der Inspiration ($\bar{v}_I$) in Abhängigkeit vom theoretischen Atemminutenvolumen (AMV) bei den drei untersuchten Gewichtsgruppen. Die Linien sind im Toleranzbereich ausgezogen.

Abbildung 11

Verlauf der mittleren inspiratorischen ($\bar{v}_I$) und exspiratorischen ($\bar{v}_E$) Atemstromstärke in Abhängigkeit vom theoretischen Atemminutenvolumen (AMV) bei der Gewichtsgruppe I.

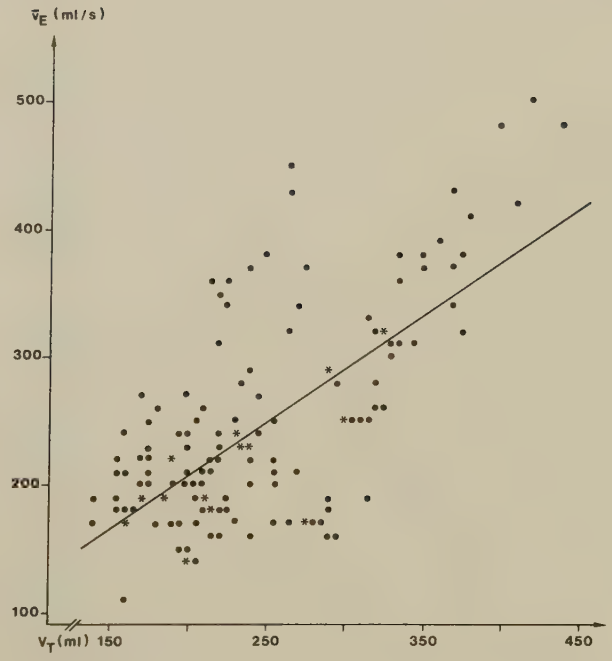


Abbildung 13

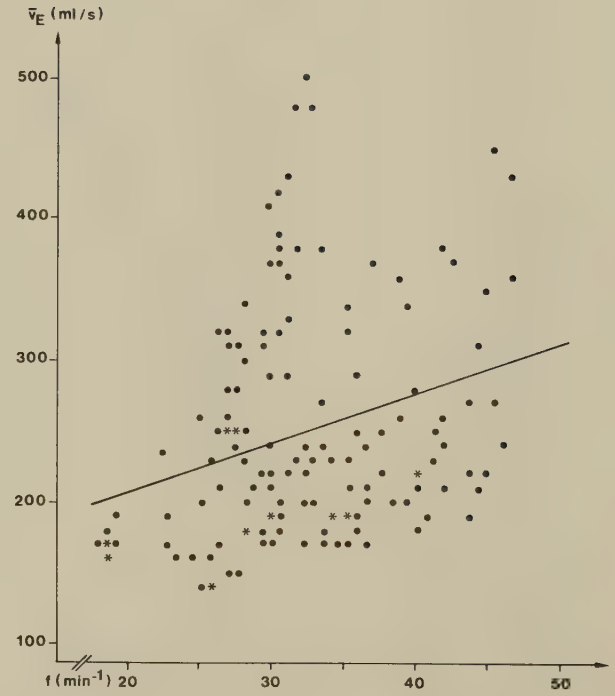


Abbildung 12

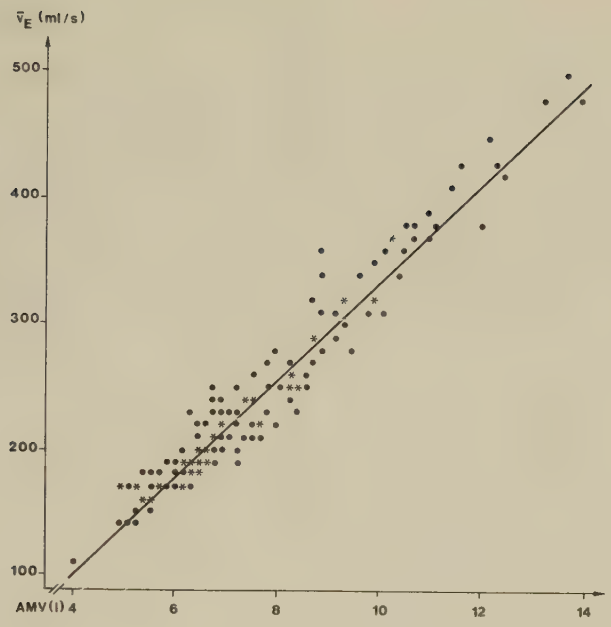


Abbildung 14

Abbildungen 12 - 14

Korrelation zwischen mittlerer Atemstromstärke während der Exspiration ($\bar{V}_E$) und der Atmungsfrequenz f (Korrelationskoeffizient r = 0,30), dem Atemzugvolumen V_T (r = 0,68) und dem theoretischen Atemminutenvolumen AMV (r= 0,98) bei der Gewichtsgruppe I (Anzahl Messungen n = 144).
Beim Symbol ✱ fallen zwei oder mehr Punkte zusammen.

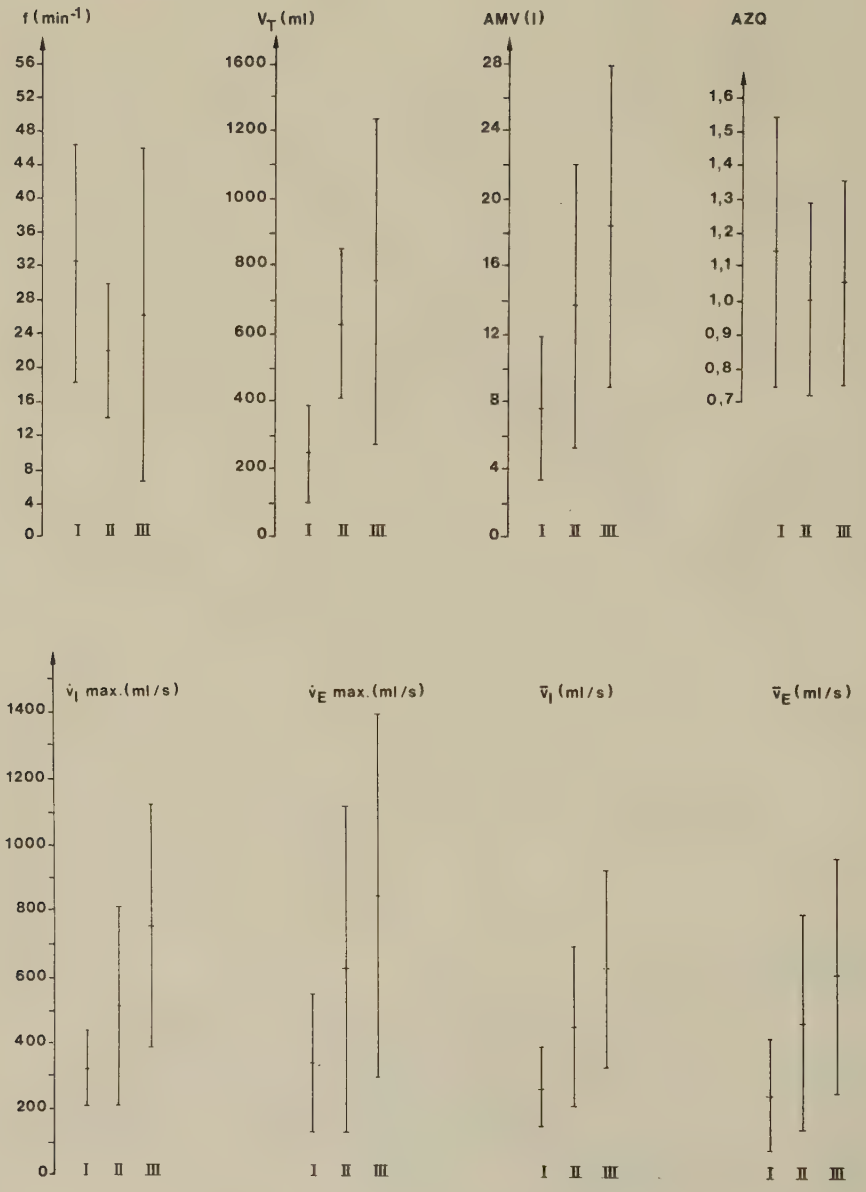


Abbildung 15

Abbildung 15

Mittelwerte und 95 % - Toleranzbereiche der Mittelwerte von 9 Messungen pro Tier der Atmungsfrequenz (f), des Atemzugvolumens (V_T), des theoretischen Atemminutenvolumens (AMV), des Atemzeitquotienten (AZQ), der maximalen in- und exspiratorischen Atemstromstärke ($\hat{v}_{I\ max.}$ und $\hat{v}_{E\ max.}$) und der mittleren in- und exspiratorischen Atemstromstärke ($\bar{v}_I$ und $\bar{v}_E$) bei den Gewichtsgruppen I (16 Tiere), II (6 Tiere) und III (12 Tiere).

5.4. Interpleuraldruck

Der Interpleuraldruck wird nicht als absoluter Druckwert gemessen, sondern auf den Atmosphärendruck bezogen und die Differenz zu diesem angegeben. Der minimale Interpleuraldruck entspricht also dem grössten Unterdruck, der maximale Interpleuraldruck ist der kleinste Unterdruck oder der grösste Ueberdruck im Vergleich zum Atmosphärendruck.

Bei allen Bestimmungen des Interpleuraldrucks gilt es zu berücksichtigen, dass der relative Messfehler gegenüber den kleinen Druckwerten sehr gross werden kann.

5.4.1. Minimaler Interpleuraldruck während der Inspiration

Der Mittelwert des grössten intrathorakalen Unterdrucks während der Inspiration oder des minimalen inspiratorischen Interpleuraldrucks beträgt:

Gewichtsgruppe I $P_{Pl\ I\ min.} = -7{,}5 \pm 1{,}6$ mm Hg ($\bar{x} \pm s$)
Gewichtsgruppe III $P_{Pl\ I\ min.} = -9{,}6 \pm 1{,}9$ mm Hg

Die 95% - Toleranzgrenzen liegen bei der Gewichtsgruppe I bei -4,0 und -11,0 mm Hg, bei der Gruppe der schwersten Schweine bei -5,3 und -13,9 mm Hg (Tabelle 3).

5.4.2. Maximaler Interpleuraldruck während der Exspiration

Der kleinste Unterdruck oder grösste Ueberdruck während der Exspiration ($P_{Pl\ E\ max.}$) beträgt für die untersuchten Tiergruppen (Tabelle 3):

- Gewichtsgruppe I $P_{Pl\ E\ max.} = -0{,}6 \pm 1{,}0$ mm Hg ($\bar{x} \pm s$)
  Der Toleranzbereich für die Gruppe I erstreckt sich von -2,7 mm Hg bis +1,5 mm Hg.
  Von den an 17 Tieren durchgeführten 85 Messungen wurde bei 9 Tieren achtzehn mal ein Druck registriert, der über dem Atmosphärendruck lag.

- Gewichtsgruppe III $P_{Pl\ E\ max.} = -1,7 \pm 1,3$ mm Hg ($\bar{x} \pm s$)
  Der Toleranzbereich lag bei -4,8 mm Hg bis +1,4 mm Hg. Bei je drei Messungen bei elf Tieren wurde nur einmal bei einem Schwein ein Ueberdruck beobachtet.

Bei den positiven Intrathorakaldrucken handelt es sich nicht um solche Atemzüge, bei denen zu Beginn der Exspiration der Atem angehalten wurde (Abbildung 1). Bei dieser Atmungsform traten regelmässig Interpleuraldrucke auf, die über dem Atmosphärendruck lagen.

5.4.3. Maximale Interpleuraldruckdifferenz

Für die Differenzen zwischen dem kleinsten inspiratorischen und dem grössten exspiratorischen Interpleuraldruck wurden folgende Werte ermittelt (Tabelle 3):

Gewichtsgruppe I $\Delta P_{Pl\ max.} = 6,9 \pm 1,3$ mm Hg ($\bar{x} \pm s$)

Gewichtsgruppe III $\Delta P_{Pl\ max.} = 8,0 \pm 2,1$ mm Hg

Die Toleranzgrenzen sind für die Gruppe I 3,9 und 9,8 mm Hg, für die Gruppe III 3,1 und 12,9 mm Hg.

5.5. Dynamische Compliance

Die dynamische Compliance ($C_{dyn.}$) wurde aus der Steigung der Diagonalen der Atmungsschleife berechnet.
Die Mittelwerte betragen (Tabelle 3):

Gewichtsgruppe I $C_{dyn} = 0,36 \pm 0,62$ l/cm H_2O ($\bar{x} \pm s$)

Gewichtsgruppe III $C_{dyn} = 0,09 \pm 0,31$ l/cm H_2O

In der Gewichtsgruppe I waren von insgesamt 85 Messungen an 17 Tieren 19 Resultate bei 8 Tieren negativ, in der Gewichtsgruppe III waren es 9 Messungen bei 4 Tieren von insgesamt 33 Messungen an 11 Schweinen.

Gründe und Möglichkeiten für das Zustandekommen dieser physiologischerweise unmöglichen Resultate werden in der Diskussion besprochen.

Die Toleranzgrenzen sind für die Gewichtsgruppe I -1,00 und 1,71 l/cm H_2O, in der Gewichtsgruppe III liegen sie bei -0,63 und 0,80 l/cm H_2O.

5. 6. Atmungsarbeit

Die Atmungsarbeit setzt sich zusammen aus der Arbeit zur Ueberwindung des elastischen Lungengewebswiderstandes und der Arbeit zur Ueberwindung der viskösen Widerstände (Reibungswiderstände des sich deformierenden Lungengewebes, Reibungswiderstände der Luft in den Atemwegen). Da die Steigung der Atmungsschleifendiagonale nicht korrekt bestimmt werden konnte, wurde auf die Berechnung der von der Compliance determinierten Arbeit zur Ueberwindung des elastischen Widerstandes verzichtet. Unter "Atmungsarbeit" wird im folgenden die Arbeit zur Ueberwindung der viskösen Widerstände verstanden. Sie wird ausgedrückt durch die vom Volumen-Druck-Diagramm eingeschlossene Fläche (Scheunert-Trautmann, 1976).

Die Atmungsarbeit zeigt eine starke Abhängigkeit vom Gewicht der Tiere, und eventuell damit im Zusammenhang, zum Atemzugvolumen. Die Korrelation ist bei der Gewichtsgruppe I enger als bei der Gruppe der schweren Tiere (Abbildung 16). Es besteht keine eindeutige Korrelation zur Atmungsfrequenz, die Atmungsarbeit neigt aber zu einer Abnahme mit steigender Atmungsfrequenz. Zum theoretischen Atemminutenvolumen konnte kein eindeutiger Zusammenhang gefunden werden.

5. 6. 1. Atmungsarbeit während eines Atmungszyklus

Die Atmungsarbeit während eines ganzen Atemzuges beträgt (Tabelle 4):

Gewichtsgruppe I $A_{total} = 1462 \pm 405$ g·cm ($\bar{x} \pm s$)
Gewichtsgruppe III $A_{total} = 5081 \pm 1757$ g·cm

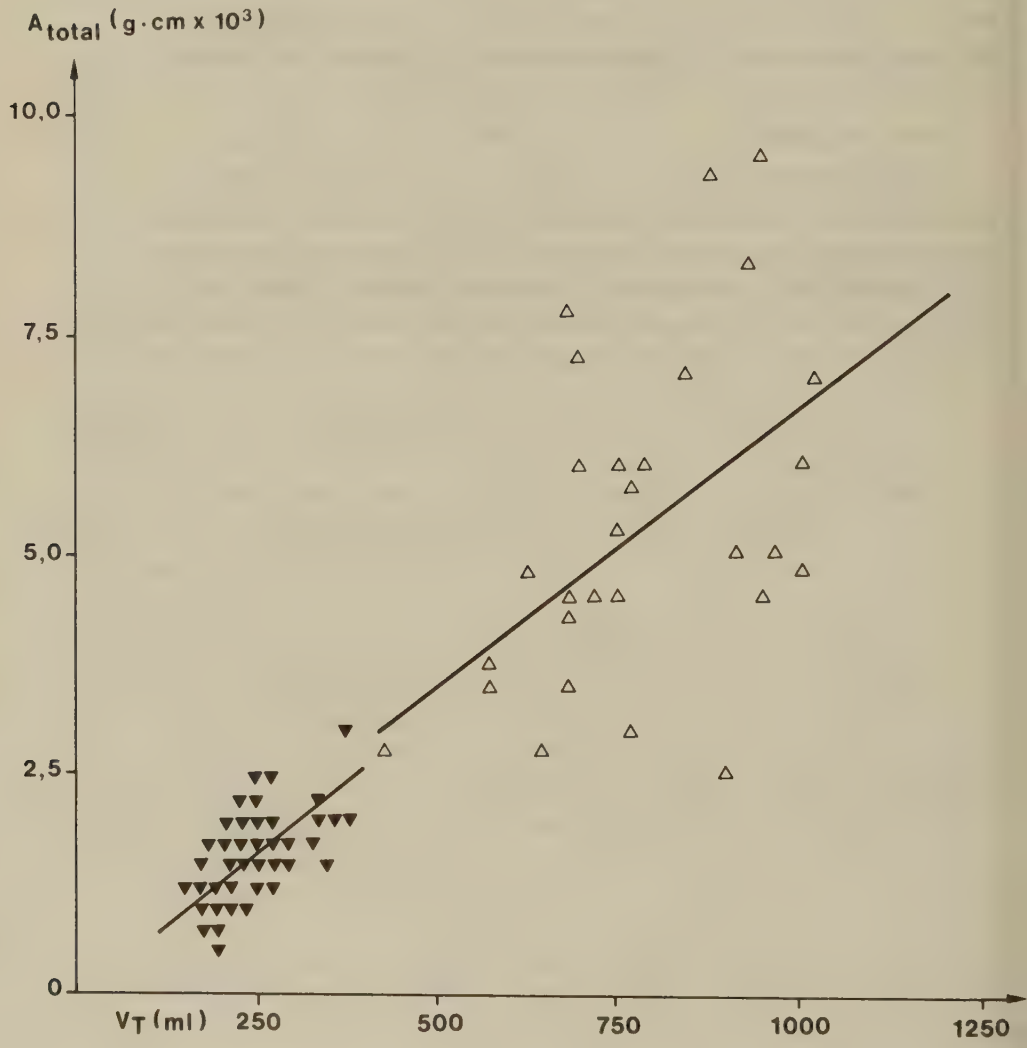
Bei der totalen viskösen Arbeit zeigte sich eine Abhängigkeit vom Atemzugvolumen. Die Regressionsgeraden lassen sich durch folgende Gleichungen ausdrücken (Abbildung 16):

Gewichtsgruppe I $y = -38{,}227 + 6{,}474\ x$ $r = 0{,}716$
Gewichtsgruppe III $y = 316{,}84 + 6{,}301\ x$ $r = 0{,}559$

Eine deutliche Abhängigkeit besteht zum Gewicht der Tiere, in dem Sinne, dass mit einer Zunahme des Gewichts eine Zunahme der totalen viskösen Atmungsarbeit verbunden ist (Abbildung 16). Zwischen den Regressionsgeraden der beiden Gewichtsgruppen besteht praktisch kein Unterschied.

Abbildung 16

Korrelation zwischen der Atmungsarbeit während eines Atmungszyklus (A_{total}) und dem Atemzugvolumen bei den Gewichtsgruppen I (▼, Anzahl Messungen n= 85, Korrelationskoeffizient r = 0,72) und III (△, n = 33, r = 0,56)



5. 6. 2. Atmungsarbeit während der Inspiration

Die visköse Atmungsarbeit während der Inspiration weist folgende Werte auf (Tabelle 4):

Gewichtsgruppe I $A_I = 772 \pm 258$ g·cm $(\bar{x} \pm s)$
Gewichtsgruppe III $A_I = 2529 \pm 1167$ g·cm

Auch bei der Atmungsarbeit während der Inspiration besteht eine Abhängigkeit vom Atemzugvolumen mit folgenden Gleichungen der Regressionsgeraden:

Gewichtsgruppe I $y = 187{,}60 + 2{,}522\ x$ $r = 0{,}430$
Gewichtsgruppe III $y = 251{,}81 + 3{,}012\ x$ $r = 0{,}408$

Die Korrelation mit dem Atemzugvolumen ist schlechter als bei der Atmungsarbeit während eines ganzen Atemzuges. Auffällig ist aber auch bei der inspiratorischen Atmungsarbeit die starke Zunahme mit steigendem Gewicht.

5. 6. 3. Atmungsarbeit während der Exspiration

Die Mittelwerte der viskösen Atmungsarbeit während der Exspiration sind (Tabelle 4):

Gewichtsgruppe I $A_E = 690 \pm 233$ g·cm $(\bar{x} \pm s)$
Gewichtsgruppe III $A_E = 2552 \pm 855$ g·cm

Die Abhängigkeit vom Atemzugvolumen lässt sich durch folgende Gleichungen ausdrücken:

Gewichtsgruppe I $y = -225{,}84 + 3{,}951\ x$ $r = 0{,}749$
Gewichtsgruppe III $y = 65{,}037 + 3{,}289\ x$ $r = 0{,}569$

5. 6. 4. Atmungsarbeit während einer Minute

Die Atmungsarbeit während einer Minute ist das Produkt aus der Atmungsarbeit während eines Atemzuges und der zugehörigen Atmungsfrequenz (A/min = $A_{total} \cdot f$).

In der Gewichtsgruppe I besteht ein Zusammenhang mit der Atmungsfrequenz, dem Atemzugvolumen und dem theoretischen Atemminutenvolumen, während in der Gewichtsgruppe III ein solcher nur mit dem theoretischen Atemminutenvolumen statistisch gesichert werden konnte.
Auch bei diesem Atmungsparameter weisen die schwereren Tiere deutlich grössere Werte auf.
Die Mittelwerte für die visköse Atmungsarbeit während einer Minute sind (Tabelle 4):

Gewichtsgruppe I A/min = 49325 ± 17240 g·cm/min ($\bar{x} \pm s$)
Gewichtsgruppe III A/min = 124238 ± 29985 g·cm/min

Die Abhängigkeiten von f, V_T, und AMV lassen sich durch folgende Gleichungen ausdrücken:

- Gewichtsgruppe I :

  Abhängigkeit von f $y = 4515,3 + 1320,0\ x$ $r = 0,604$

  Abhängigkeit von V_T $y = 13944 + 152,63\ x$ $r = 0,418$

  Abhängigkeit von AMV $y = -6712,0 + 7213,6\ x$ $r = 0,827$

- Gewichtsgruppe III :

  Abhängigkeit vom AMV $y = 30745 + 4986,4\ x$ $r = 0,559$

5. 6. 5. Atmungsarbeit je Milliliter

Die Atmungsarbeit für die Ventilation eines Milliliters Atemluft wird aus dem Quotient $A/ml = A_{total} / V_T$ berechnet. Sie ist mit keiner der untersuchten Variablen korreliert.

Ihre Mittelwerte betragen (Tabelle 4):

Gewichtsgruppe I A/ml = 6,3 ± 1,2 g·cm/ml ($\bar{x} \pm s$)
Gewichtsgruppe III A/ml = 6,7 ± 1,7 g·cm/ml

Zwischen den beiden Gewichtsgruppen bestehen keine wesentlichen Unterschiede.

5. 6. 6. Atmungsarbeit je inspiriertem Milliliter

Die Atmungsarbeit je inspiriertem Milliliter wird aus dem Quotienten $A_I/ml = A_I / V_T$ berechnet. Sie steht mit keiner der untersuchten Variablen in einer strengen Abhängigkeit.

Die Mittelwerte sind:

Gewichtsgruppe I $A_I/ml = 3,4 \pm 1,0$ g·cm/ml ($\bar{x} \pm s$)
Gewichtsgruppe III $A_I/ml = 3,4 \pm 1,2$ g·cm/ml

5. 6. 7. Atmungsarbeit je exspiriertem Milliliter

Die Arbeit zur Ueberwindung der viskösen Widerstände bei der Exspiration eines Milliliters Atemluft berechnet sich nach der folgenden Formel: $A_E/ ml = A_E / V_T$.

Gegenüber der Atmungsfrequenz, dem Atemzugvolumen und dem Atemminutenvolumen wurde in der Gewichtsgruppe I eine statistisch gesicherte Abhängigkeit festgestellt, in der Gewichtsgruppe III besteht keine Beziehung zwischen diesen Atmungsgrössen und der Atmungsarbeit für die Exspiration eines Milliliters Atemluft.

Die Mittelwerte betragen (Tabelle 4):

Gewichtsgruppe I $A_E/ml = 2,9 \pm 0,7$ g·cm/ml ($\bar{x} \pm s$)
Gewichtsgruppe III $A_E/ml = 3,4 \pm 0,9$ g·cm/ml

Die Abhängigkeiten von f, V_T und AMV lassen sich für die Gewichtsgruppe I durch folgende Gleichungen ausdrücken:

Abhängigkeit von f $y = 1,194 + 0,051\ x$ $r = 0,508$
Abhängigkeit von V_T $y = 2,101 + 0,004\ x$ $r = 0,224$
Abhängigkeit von AMV $y = 1,105 + 0,236\ x$ $r = 0,614$

5.7. Funktionelle Residualkapazität

Die Resultate der Messung der Funktionellen Residualkapazität (FRK) sind:

Gewichtsgruppe I	FRK = 519 ± 110 ml	($\bar{x} \pm s$)
Gewichtsgruppe II	FRK = 1332 ± 143 ml	
Gewichtsgruppe III	FRK = 1846 ± 91 ml	

Aus diesen Werten geht hervor, dass die FRK stark vom Körpergewicht abhängig ist. Die Toleranzgrenzen der FRK der drei Gewichtsgruppen überschneiden sich auch nur auf einem ganz kleinen Gebiet (Tabelle 5).
Die Funktionelle Residualkapazität bezogen auf das Körpergewicht wird als spezifische FRK (spez. FRK = FRK / kg Körpergewicht) bezeichnet. Ihre Werte betragen für die drei Gewichtsgruppen:

Gewichtsgruppe I	spez. FRK = 24,3 ± 3,6	ml/kg KGW ($\bar{x} \pm s$)
Gewichtsgruppe II	spez. FRK = 19,5 ± 1,7	ml/kg KGW
Gewichtsgruppe III	spez. FRK = 18,4 ± 1,1	ml/kg KGW

Die drei Gewichtsgruppen unterscheiden sich bezüglich der spezifischen FRK nicht.

5.8. Helium - Einmischzeit

Die Zeitspanne bis zur homogenen Durchmischung der Luft im Atmungsapparat mit dem Helium aus der Spirometerglocke wird als He - Einmischzeit bezeichnet. Ihre Mittelwerte betragen (Tabelle 5):

Gewichtsgruppe I	1,7 ± 0,7 min	($\bar{x} \pm s$)
Gewichtsgruppe II	2,0 ± 1,0 min	
Gewichtsgruppe III	2,3 ± 0,4 min	

Es bestehen keine wesentlichen Unterschiede zwischen den mittleren He - Einmischzeiten der drei Gewichtsgruppen.

Tabelle 2

Atmungsfrequenz (f), Atemzugvolumen (V_T), theoretisches Atemminutenvolumen (AMV), Atemzeitquotient (AZQ), maximale Atemstromstärke während der Inspiration ($\dot{v}_{I\ max.}$) und der Exspiration ($\dot{v}_{E\ max.}$) und mittlere Atemstromstärke während der Inspiration ($\bar{v}_I$) und der Exspiration ($\bar{v}_E$) bei den drei untersuchten Gewichtsgruppen.

Es werden die Mittelwerte ($\bar{x}$), Standardabweichungen (s) und 95% - Toleranzgrenzen aus den Durchschnitten von 9 Messungen pro Tier angegeben. (n = Anzahl Tiere).

Tabelle 2

		f (min^{-1})	V_T (ml)	AMV (l)	AZQ	$\dot{V}_{I\ max.}$ (ml/s)	$\dot{V}_{E\ max.}$ (ml/s)	$\bar{V}_I$ (ml/s)	$\bar{V}_E$ (ml/s)
Gewichtsgruppe I n = 16	$\bar{x}$	32,2	246	7,7	1,15	323	339	272	247
	s	6,4	64	1,9	0,18	54	95	54	76
	Toleranzgrenzen	18,1	105	3,5	0,75	205	129	154	80
		46,3	387	11,9	1,55	441	549	390	414
Gewichtsgruppe II n = 6	$\bar{x}$	21,8	627	13,8	1,01	512	626	455	467
	s	2,8	81	3,0	0,10	110	178	87	117
	Toleranzgrenzen	13,9	403	5,4	0,73	208	131	212	142
		29,7	851	22,2	1,29	816	1121	698	792
Gewichtsgruppe III n = 12	$\bar{x}$	26,0	755	18,5	1,06	754	850	630	609
	s	8,6	210	4,1	0,13	161	241	130	156
	Toleranzgrenzen	6,3	275	9,0	0,76	385	298	331	252
		45,7	1235	28,0	1,36	1123	1402	929	966

		$P_{Pl\ I\ min.}$ (mm Hg)	$P_{Pl\ E\ max.}$ (mm Hg)	$\Delta P_{Pl\ max.}$ (mm Hg)	$C_{dyn.}$ (l/cm H_2O)
Gewichtsgruppe I n = 17	$\bar{x}$	- 7,5	- 0,6	6,9	0,36
	s	1,6	1,0	1,3	0,62
	Tole-ranz-grenzen	-11,0 - 4,0	- 2,7 1,5	3,9 9,8	-1,00 1,71
Gewichtsgruppe III n = 11	$\bar{x}$	- 9,6	- 1,7	8,0	0,09
	s	1,9	1,3	2,1	0,31
	Tole-ranz-grenzen	-13,9 - 5,3	- 4,8 1,4	3,1 12,9	-0,63 0,80

Tabelle 3

Minimaler Interpleuraldruck während der Inspiration ($P_{Pl\ I\ min.}$), maximaler Interpleuraldruck während der Exspiration ($P_{Pl\ E\ max.}$), maximale Interpleuraldruckdifferenz ($\Delta P_{Pl\ max.}$) und dynamische Compliance ($C_{dyn.}$) bei den Gewichtsgruppen I und III.

Es werden die Mittelwerte ($\bar{x}$), Standardabweichungen (s) und 95% - Toleranzgrenzen aus den Durchschnitten von 5 (Gruppe I), resp. 3 (Gruppe III), Messungen pro Tier angegeben. (n = Anzahl Tiere).

Tabelle 4

Atmungsarbeit während eines Atmungszyklus (A_{total}), Atmungsarbeit während der Inspiration (A_I) und der Exspiration (A_E), Atmungsarbeit während einer Minute (A/min), Atmungsarbeit je Milliliter (A/ml), Atmungsarbeit je inspiriertem (A_I/ml) und je exspiriertem (A_E/ml) Milliliter und Atmungsfrequenz (f), Atemzugvolumen (V_T) und theoretisches Atemminutenvolumen (AMV) während der Interpleuralpunktion bei dem Gewichtsgruppen I und III.

Es werden die Mittelwerte ($\bar{x}$), Standardabweichungen (s) und 95% - Toleranzgrenzen von den Durchschnitten aus 5 (Gruppe I), resp. 3 (Gruppe III), Messungen pro Tier angegeben.
(n = Anzahl Tiere).

Tabelle 4

		f (min^{-1})	V_T (ml)	AMV (l)	A_{total} (g·cm)	A_I (g·cm)	A_E (g·cm)	A/min $\frac{g \cdot cm}{min}$	A/ml $\frac{g \cdot cm}{ml}$	A_I/ml $\frac{g \cdot cm}{ml}$	A_E/ml $\frac{g \cdot cm}{ml}$
Gewichtsgruppe I n = 17	$\bar{x}$	34,0	232	7,8	1462	772	690	49325	6,3	3,4	2,9
	s	8,5	49	2,1	405	258	233	17240	1,2	1,0	0,7
	Toleranzgrenzen	15,5 52,5	125 339	3,2 12,4	577 2347	209 1335	182 1198	11718 86932	3,7 8,9	1,2 5,6	1,5 4,3
Gewichtsgruppe III n = 11	$\bar{x}$	26,6	756	18,7	5081	2529	2552	124238	6,7	3,4	3,4
	s	11,0	171	4,1	1757	1167	855	29985	1,7	1,2	0,9
	Toleranzgrenzen	1,0 52,2	358 1154	9,2 28,2	992 9170	0 5245	562 4542	54456 194020	3,7 11,7	0,6 6,2	1,2 5,6

GEWICHTSGRUPPE	I	II	III
n	17	7	5
FRK (ml)			
$\bar{x}$	519	1332	1846
s	110	143	91
Toleranz-grenzen	278 760	959 1705	1568 2124
Spezifische FRK (ml/kg KGW)			
$\bar{x}$	24,3	19,5	18,4
s	3,6	1,7	1,1
Toleranz-grenzen	16,5 32,1	14,9 24,1	15,1 21,7
He-Einmischzeit (min)			
$\bar{x}$	1,7	2,0	2,3
s	0,7	1,0	0,4
Toleranz-grenzen	0,1 3,3	-0,6 4,6	1,1 3,5

Tabelle 5

Funktionelle Residualkapazität (FRK), spezifische FRK und Helium - Einmischzeit bei den drei Gewichtsgruppen.

Es werden die Mittelwerte ($\bar{x}$), Standardabweichungen (s) und 95% - Toleranzgrenzen von den Durchschnitten zweier Bestimmungen pro Tier angegeben. (n = Anzahl Tiere).

6. DISKUSSION

6.1. Ventilationsgrössen

Die ermittelten Masszahlen für die Lungenventilation (Atmungsfrequenz, Atemzugvolumen, theoretisches Atemminutenvolumen) schwanken relativ stark sowohl beim Einzeltier als auch innerhalb einer ganzen Gewichtsgruppe. Dies ist verständlich, denn die Atmung wird von mancherlei Faktoren beeinflusst. Die Ventilationsgrössen sind zum Beispiel abhängig von körperlichen Leistungen, von der Körpertemperatur, von der Umgebungstemperatur und vom Alter (Hippel, 1966; Ingram, 1964; Rossier und Bühlmann, 1959; Scheunert-Trautmann, 1976; Schulze et al., 1963; Steinhardt und Studzinsky, 1967). Eine wesentliche Rolle für die Atmung spielt die nervöse Erregung. So wird beim Menschen ein Krankheitsbild, das "Hyperventilationssyndrom" als Ausdruck krankhaft verarbeiteter Erlebnisinhalte beschrieben (Bühlmann und Rossier, 1970). Wittke (1957) schreibt die grosse Variabilität der Atemfrequenz von Pferden in Ruhe extrarespiratorischen Faktoren, zum Beispiel der "Stimmung" im verhaltensphysiologischen Sinne, zu.

Ein Hinweis auf den grossen Einfluss des psychischen Zustands auf die Ventilationsgrössen ist die kontinuierliche Abnahme der Atmungsfrequenz mit zunehmender Anzahl Untersuchungen bei den meisten Tieren. Ein Gewöhnungseffekt bei wiederholten Untersuchungen am selben Tier ist also vorhanden. Unter Berücksichtigung der extrarespiratorischen Faktoren ist die grosse Variabilität unserer Messwerte leicht verständlich. Trotz Auswahl der Versuchstiere aus der gleichen Zucht und Untersuchung unter weitgehend übereinstimmenden Bedingungen erstrecken sich die 95% - Toleranzbereiche für die Atmungsfrequenz aller Tiere im Extremfall von 6,3 /min bis 45,7 /min (Gewichtsgruppe III).

Für eine gegebene alveoläre Ventilation existiert eine Atmungsfrequenz mit einer minimalen Atmungsarbeit und eine andere Atmungsfrequenz mit minimalem Energieaufwand für die Atmungsmuskulatur (Mead, 1960; Otis, 1954). Bei schneller oberflächlicher Atmung steigt die Atmungsarbeit infolge turbulenter Strömung der Atemluft stark an, bei langsamer tiefer Atmung wird der Aufwand zur Ueberwindung der elastischen Kräfte der Lunge und des Thorax gross (Albright and Bondurant, 1965; Fry and Hyatt, 1960).

Unsere Werte für die Atmungsfrequenz stimmen mit den Angaben aus der Literatur zum Teil recht gut überein. Unsere Werte liegen nur wenig höher als bei Untersuchungen ohne jegliche Irritierung der Schweine, einige Untersucher fanden sogar noch höhere Atmungsfrequenzen (Amoroso et al., 1964; Hippel, 1966; Schulze et al., 1965). Berechnet man die gemäss Körpergewicht erwartete Atmungsfrequenz nach Hörnicke (1969), so stimmt diese mit den von uns beobachteten Daten ziemlich genau überein. Eine Ausnahme macht die Gruppe der schweren Schweine (Gewichtsgruppe III), die höhere Werte aufweist. Bei dieser Gruppe fällt auch die grosse Variabilität auf. Verglichen mit dem Menschen entsprechen unsere Werte etwa denen, die bei leichter Körperarbeit gefunden wurden (Altman and Dittmer, 1971; Comroe et al.,1968; Documenta Geigy, 1968).

Die Werte für das Atemzugvolumen und für das Atemminutenvolumen liegen bei den leichten Tieren (Gewichtsgruppe I) etwas höher als bei vergleichbaren Messungen an Göttinger Miniaturschweinen mit ähnlichen Gewichten (Denac, 1977; Georgiev, 1975). Auch gegenüber den nach Hörnicke (1969) berechneten Werten sind unsere Messwerte bei den kleinen Tieren grösser ausgefallen, während das mittlere Atemzugsvolumen und Atemminutenvolumen bei den grösseren Tieren (61 - 107 kg Körpergewicht) genau mit seinen theoretisch erwarteten Werten zusammenfallen. Das Atemzugvolumen liegt in derselben Grössenordnung wie bei Menschen mit entsprechendem Körpergewicht, das theoretische Atemminutenvolu-

men ist einiges grösser, da auch die Atmungsfrequenz grösser ist als bei Menschen in Ruhe (Altman and Dittmer, 1971; Comroe et al., 1968; Documenta Geigy, 1969).

Bemerkenswert ist, dass die Ventilationsgrössen während der Interpleuraldruckmessung nicht verändert wurden; dies lässt darauf schliessen, dass sich die Tiere durch die Punktion des Interpleuralspalts nicht irritieren liessen, und dass sich die Versuchsbedingungen mit denen vergleichen lassen, wo die Tiere ausser der Immobilisation in der Hängematte und dem Tragen einer Atmungsmaske keinem Zwang ausgesetzt waren.

6.2. Atemzeitquotient

Eingehende Untersuchungen über die Natur des Atemzeitquotienten führte Gretener (1975) bei Pferden durch. Er fand eine enge Beziehung zwischen dem Atemzeitquotienten und der Atmungsfrequenz und dem Atemzugvolumen in dem Sinne, dass sowohl eine Frequenzerhöhung als auch eine Zunahme des Atemzugvolumens eine Reduktion des AZQ zur Folge haben. Ausserdem wird der AZQ mit zunehmendem theoretischem Atemminutenvolumen kleiner. Bei einer Gruppe von Pferden mit chronisch obstruktiven Lungenerkrankungen konnte in der überwiegenden Zahl der Fälle ein erhöhter Wert für den AZQ gefunden werden. Beim Schwein besteht zwar eine gewisse Beeinflussung des Atemzeitquotienten von der Atmungsfrequenz, vom Atemzugvolumen und vom Atemminutenvolumen; die Beziehungen zwischen diesen Ventilationsgrössen und dem AZQ sind aber sehr locker. Dies braucht nicht ein Widerspruch zu sein zu den Untersuchungen Greteners (1975). Dieser hatte in seinem Untersuchungsgut auch sedierte Pferde mit Atmungsfrequenzen zwischen 5 /min und 10 /min, während unsere Schweine durchwegs unsediert waren und folglich auch höhere Atmungsfrequenzen aufwiesen. Es sind nun aber gerade die langsamen Atemzüge, die zu einem deutlichen Anstieg des AZQ führen. Dieser Umstand mag dazu beigetragen haben, dass wir keine engen Beziehungen zwischen f, V_T, AMV und dem AZQ fanden.

6.3. Atemstromstärke

Die Bestimmung der mittleren und maximalen, nicht willkürlich erhöhten Atemstromstärken spielen in der Humanmedizin keine Rolle, da beim Menschen durch die Messung willentlich beeinflusster Atemstromstärken Untersuchungsmethoden mit grösserer Aussagekraft zur Verfügung stehen. Allen Versuchen, Tiere zum Beispiel mit Atemstimulantien zu einer forcierten Atmung zu zwingen,haftet die Unsicherheit an, ob wirklich die grösstmögliche Atemstromstärke erreicht wurde.

Angaben über die mittleren Atemstromstärken während In- und Exspiration werden bei Pferden von Sasse (1971) und Husch (1974) gemacht. Gretener (1976) stellt die mittlere Atemstromstärke von Pferden dem Atemminutenvolumen gegenüber und findet bei einer Erhöhung desselben einen linearen Anstieg der Atemstromstärke, wobei die exspiratorische Atemstromstärke steiler ansteigt als die inspiratorische. Das hängt wohl damit zusammen, dass bei grösserer Ventilation die Exspiration zum durch Beteiligung der Atmungsmuskulatur aktiven Vorgang wird. Die vom AMV und der mittleren inspiratorischen und exspiratorischen Atemstromstärke bestimmten Regressionsgeraden haben die gleiche Steigung wie die Regressionsgeraden bei unseren Schweinen. Es scheinen also Gesetzmässigkeiten über die tierartlichen Grenzen hinaus zu bestehen.

Vergleichende Untersuchungen an Pferden mit obstruktiven Lungenerkrankungen haben gezeigt, dass solche Lungenaffektionen eine Reduktion der exspiratorischen Atemstromstärke zur Folge haben, und gleichzeitig eine kompensatorische Vergrösserung der inspiratorischen Stromstärke auftritt (Gretener, 1976). Die Bestimmung der mittleren Atemstromstärken bezogen auf das Atemminutenvolumen hat also eine gewisse Bedeutung in der veterinärmedizinischen Lungenfunktionsdiagnostik. Es wurden denn auch von Gillespie et al. (1966), Gillespie and Tyler (1969) und Sasse (1971) vergleichende Untersuchungen dieses Atmungsparameters unternommen, es konnten aber ohne Bezugnahme auf das AMV nicht signifikante Unterschiede zwischen gesunden Tieren und Pferden mit obstruktiven Lungenerkrankungen gefunden werden.

Die maximale Atemstromstärke stellt den höchsten Wert der Stromstärke bei einem Atemzug ohne künstliche Steigerung der Atemströmung dar. Auch bei diesem Parameter wird analog der mittleren Atemstromstärke mit zunehmendem theoretischen Atemminutenvolumen ein Anstieg beobachtet, der für exspiratorische Stromstärken steiler verläuft als für inspiratorische. Amoroso et al. (1964) publizierten Mittelwerte von einem Schwein, die sich mit unseren Beobachtungen etwa vergleichen lassen.

6.4. Interpleuraldruck

Die Differenz zwischen dem Interpleuraldruck und dem Atmosphärendruck bestimmt zusammen mit dem Strömungswiderstand der Luftwege die Atemstromstärke. Die Druck-Fluss-Beziehung ist nur bei kleinen intrathorakalen Druckänderungen linear, d.h. eine weitere Erhöhung des Druckes auf die Lunge führt nach Ueberschreiten eines kritischen Werts zu einer Verminderung des Flusses (Fry, 1959; Fry and Hyatt, 1960; Pride et al., 1967). Diese Erscheinung steht im Zusammenhang mit Kaliberschwankungen der Bronchien, die durch verstärkte Druckänderungen ausgelöst werden. Es ist bekannt, dass schon kleine Veränderungen des Bronchiallumens zu grossen Widerstandsänderungen Anlass geben (v. Neergard und Wirz, 1927). Bei Patienten mit obstruktiven Lungenerkrankungen wird zur Ueberwindung der erhöhten exspiratorischen Strömungswiderstände ein hoher Intrathorakaldruck aufgewendet, der seinerseits die Luftwege komprimieren kann (Bachofen, 1969). Dieser Ventilmechanismus, d.h. die Verstärkung der Obstruktion bei forcierter Exspiration infolge zusätzlicher Muskelanstrengung, wird von mehreren Autoren beschrieben (Bühlmann und Rossier, 1970; Comroe et al., 1968; Dirnagl, 1957; Macklem et al., 1963; Pride et al., 1967; Scherrer, 1966).

Der Intrathorakaldruck dürfte bei Tieren neben der Berechnung der Atmungsarbeit einer der wichtigsten Parameter zur Erfassung obstruktiver Lungenerkrankungen sein. Sasse (1971) und Gillespie et al. (1966) fanden bei Pferden mit Lungenemphysem erhöhte Werte der maximalen Interpleuraldruckänderung.

Die von uns gemessenen grössten Unterdrucke während der Inspiration sind etwas grösser als in vergleichbaren Literaturangaben, der Mittelwert der kleinsten Unterdrucke während der Exspiration etwas kleiner und damit die maximale Interpleuraldruckamplitude etwas grösser als vergleichbare Resultate beim Menschen (Altman and Dittmer, 1971) und Pferd (Gillespie et al., 1966). Dieser Umstand dürfte damit zusammenhängen, dass bei willkürlicher Hyperventilation oder bei Körperaktivität die Druckamplituden grösser werden und dabei während der Exspiration infolge der durch die Atmungsmuskulatur aktiv erfolgenden Ausatmung positive Drucke entstehen (Rossier und Bühlmann, 1959). Bereits bei der Beobachtung der Atmungsfrequenz erhielten wir Werte, die beim Menschen einer leichten Körperarbeit adäquat wären.

6.5. Compliance

Die statische Compliance ist in der humanmedizinischen Lungenfunktionsdiagnostik ein wichtiges Mass zur Beurteilung der Dehnbarkeit des Lungengewebes. In der Veterinärmedizin kann die statische Compliance nur im Moment des Uebergangs von der Inspiration zur Exspiration und umgekehrt bestimmt werden, da in diesem Moment keine Luftströmung herrscht. Werden in einem Volumen-Druck-Diagramm diese beiden Punkte miteinander verbunden, so ist die Steigung dieser Schleifendiagonale ein Mass für die dynamische Compliance der Lunge.

Bei unseren Messungen haben wir häufig Atemzüge registriert, bei denen der Interpleuraldruck zu Beginn der Inspiration stärker negativ war als zu Beginn der Exspiration. Dadurch steigt die Schleifendiagonale an und es werden negative Compliance-Werte berechnet. Diese theoretisch unmöglichen Werte sind wahrscheinlich auf folgende methodischen Fehler zurückzuführen:

- Reelle statische Druckverhältnisse liegen nur bei sehr langsamer Atmung mit 1-2 Sekunden dauerndem Atemstillstand am Ende des Ex- und Inspiriums vor (Koenig, 1972). Aus dem Pneumotachogramm (Abbildung 1) ist klar ersichtlich, dass bei Spontanatmung keine Atempausen entstehen.
  Es ist denkbar, dass durch die Trägheit der Luft- und Lungengewebemassen diese am Ende einer Inspiration noch in Bewegung sind, wenn am Mund bereits keine Luftströmung mehr registriert werden kann. Durch den Aufprall der Luft- und Gewebemassen auf die Thoraxwand entsteht eine positive Druckkomponente zu Beginn einer Exspiration.

- Wegen der relativ niedrigen Eigenfrequenz des Druckmess-Systems (Statham-Element) können bei Atmungsfrequenzen über 60 /min falsche Werte gemessen werden (Koenig, 1972).

- Die unterschiedliche Messmethodik der Luftströmungsänderung (Luftübertragung) und der Druckänderung (Flüssigkeitsübertragung) führt zu einer Verspätung des Pneumotachogramms von 0,01 s gegenüber der Interpleuraldruckkurve. Besonders beim Uebergang Inspiration-Exspiration ist die Interpleuraldruckkurve steil, eine Verschiebung des Phasenwechselpunktes führt damit zu einem relativ grossen Fehler, und da sich der Fehler doppelt auswirkt (bei beiden Phasenwechseln), kann leicht eine Schleifendiagonale mit umgekehrter Steigung registriert werden.

- Infolge der Steilheit des ansteigenden Schenkels der Interpleuraldruckkurve entsteht ein schleifender Schnittpunkt mit der Gerade durch den Nullpunkt des Pneumotachogramms und damit eine Fehlerquelle bei der Bestimmung des Phasenwechselpunktes auf der Atmungsschleife.

Unsere Messungen der Compliance sind wahrscheinlich aus den genannten Gründen falsch und teilweise sogar physiologisch unmöglich ausgefallen und daher als Normalwerte nicht zu gebrauchen.

6.6. Atmungsarbeit

Die Atmungsarbeit ist gleich dem Produkt aus Druck mal Volumen mit der Dimension g.cm. Die von der Atmungsschleife (Volumen-Druck-Diagramm) eingeschlossene Fläche ist ein Mass für die zur Ueberwindung der (nichtelastischen) viskösen Widerstände (Viscance) aufgewendete Arbeit. 70 - 80 % der Arbeit zur Ueberwindung der viskösen Widerstände werden durch den Strömungswiderstand der Luft in den Atemwegen bestimmt, 20-30 % fallen auf Reibungswiderstände des sich deformierenden Lungengewebes (Marshall and Dubois, 1957). Der Luftströmungswiderstand wird determiniert durch die Oeffnungsweite der Atemwege und durch die Luftströmungsstärke. Bei geringer Stromstärke gilt das Gesetz von Hagen-Poiseuille, wonach das Durchflussvolumen proportional ist zur 4. Potenz des Radius eines Rohrquerschnitts (Comroe et al., 1968). Daraus kann geschlossen werden, dass schon kleinste Lumenverengungen der Atemwege, zum Beispiel durch Sekretauflagerungen, Schleimhautschwellungen oder Bronchospasmen, zu gewaltigen Widerstandserhöhungen führen. Diesbezügliche Untersuchungen wurden von mehreren Autoren durchgeführt (Dirnagl, 1957; v. Neergard und Wirz, 1926; Sheldon, 1961).

Gillespie et al. (1966) fanden bei emphysematösen Pferden eine Erhöhung der Atmungsarbeit während der Exspiration. Sasse (1971) betrachtet die viskose Arbeit pro Minute als wichtigsten Parameter zur Erfassung obstruktiver Ventilationsstörungen, empfiehlt aber auch die Bestimmung der durchschnittlichen viskösen Arbeit pro Volumeneinheit. Er stellte bei Pferden mit chronisch obstruktiven Lungenkrankheiten eine starke Erhöhung der viskösen Arbeit pro ausgeatmetem Liter fest und fand eine geringere Erhöhung der Arbeit je inspiriertem Liter. Mit diesen Befunden steht er in Uebereinstimmung mit den Arbeiten von v. Neergard und Wirz (1926).

Nach Rossier und Bühlmann (1959) verhalten sich die Atmungsarbeit pro Minute und das Atemminutenvolumen wie eine quadratische Funktion. Wir fanden hingegen eine eindeutig lineare Beziehung zwischen dem theoretischen Atemminutenvolumen und der Atmungs-

arbeit pro Minute. Das ist zurückzuführen auf die Linearität der Beziehung zwischen der Atmungsarbeit während eines Atemzuges und dem Atemzugvolumen (Abbildung 16); diese beiden Variablen multipliziert mit der Atmungsfrequenz ergeben nämlich Atmungsarbeit pro Minute und theoretisches Atemminutenvolumen.

Vergleicht man die Resultate, die Sasse (1971) an Pferden erhoben hat, mit unseren Messungen, so findet man, bezogen auf dasselbe Atemzugvolumen, weitgehend vergleichbare Werte für die Atmungsarbeit während eines ganzen Atemzuges und aufgeteilt nach Inspiration und Exspiration. Dabei ist die Atmungsarbeit der Schweine um rund 15 % grösser als bei den Pferden. Dies dürfte ein weiterer Hinweis sein auf die bei verschiedenen Tierarten bestehende Abhängigkeit der Atmungsarbeit zur Ueberwindung der viskösen Widerstände vom Atemzugvolumen.

6.7. Funktionelle Residualkapazität

Da die FRK für ihre Bestimmung eine aktive Mitarbeit der Tiere nicht erfordert, ist sie für vergleichende Untersuchungen zur Lungenfunktion besonders geeignet. Messungen der FRK an verschiedenen Haus- und Labortieren führten mehrere Autoren durch (Crosfill and Widdicombe, 1961; Denac, 1976; Simmons and Hemingway, 1956). Nach Denac (1976) haben emphysematöse Pferde eine signifikant höhere FRK als gesunde Kontrolltiere. Cook et al. (1958) berechneten eine Beziehung der FRK zur Körpergrösse, Hörnicke (1969) eine solche zum Körpergewicht. In der Literatur wird die Funktionelle Residualkapazität meist als Volumeneinheit pro Kilogramm Körpergewicht angegeben.

Unsere Messwerte liegen um fast einen Drittel tiefer als die von anderen Autoren bei Schweinen (Attinger and Cahill, 1960), anderen Tieren und beim Menschen (Altman and Dittmer, 1971; Comroe et al., 1971) erhobenen Daten. Auch die nach der Formel von Hörnicke (1969) erwartete FRK ist grösser als unsere Messungen. Eine Erklärung für diese Diskrepanz konnte nicht gefunden werden.

7. ZUSAMMENFASSUNG

Für drei Gewichtsgruppen von Veredelten Landschweinen werden Mittelwerte, Standardabweichungen und 95% - Toleranzgrenzen folgender Parameter angegeben: Atmungsfrequenz, Atemzugvolumen, theoretisches Atemminutenvolumen, Atemzeitquotient, maximale und mittlere Atemstromstärke während Inspiration und Exspiration, Interpleuraldruck, Atmungsarbeit zur Ueberwindung der viskösen Widerstände während eines ganzen Atemzuges, während der Inspiration und Exspiration, Atmungsarbeit während einer Minute, Atmungsarbeit je ventiliertem Milliliter und je inspiriertem und exspiriertem Milliliter, Funktionelle Residualkapazität und Helium-Einmischzeit. Für die dynamische Compliance wurden teilweise physiologisch unmögliche Werte gefunden. Die Gründe dafür werden diskutiert.

Die Angaben sind als Normalwerte für SPF-Tiere unter standardisierten Versuchsbedingungen aufzufassen.

Atemzeitquotient, Atemstromstärke und die Atmungsarbeit werden zu den Ventilationsgrössen Atmungsfrequenz, Atemzugvolumen und theoretisches Atemminutenvolumen in Beziehung gesetzt.

Die Atmungsparameter werden mit entsprechenden Angaben aus anderen Untersuchungen an Schweinen und weiteren Tierarten (Minipig, Hund, Pferd, Mensch) verglichen.

8. LITERATURVERZEICHNIS

Albright C.D. and S. Bondurant: Some effects of respiratory frequency on pulmonary mechanics
J. Clin. Invest. 44, 1362-1370 (1965)

Altman P.L. and D.S. Dittmer: Respiration and Circulation
Biological Handbooks, Federation of the American Societies for Experimental Biology, Bethesda, Maryland (1971)

Amoroso E.C., P. Scott and K.G. Williams: The pattern of external respiration in the unanaesthetized animal
Proc. Roy. Soc. London 159, 325-347 (1964)

Attinger E.O. and J.M. Cahill: Cardiopulmonary mechanics in anaesthetized pigs and dogs
Am. J. Physiol. 198, 346-348 (1960)

Bachofen H.: Die mechanischen Eigenschaften der Lunge
Verlag Hans Huber, Bern, Stuttgart, 1. Aufl. (1969)

Bertschinger H.U., H. Keller, A. Löhrer und W. Wegmann: Der zeitliche Verlauf der experimentellen enzootischen Pneumonie beim SPF-Schwein
Schweiz. Arch. Tierheilk. 114, 107-118 (1972)

Bühlmann A.A. und P.H. Rossier: Klinische Pathophysiologie der Atmung
Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York (1970)

Comroe J.H., R.E. Forster, A.B. Dubois, W.A. Briscoe und E. Carlsen: Die Lunge
Verlag F.K. Schattauer, Stuttgart, 2. Aufl. (1968)

Cook C.D., P.J. Helliesen and S. Agathon: Relation between mechanics of respiration, lung size and body size from birth to young adulthood
J. Appl. Physiol. 13, 349-352 (1958)

Crosfill M.L. and J.G. Widdicombe: Physical characteristics of the chest and lungs and the work of breathing in different mammalian species
J. Physiol. 158, 1-14 (1961)

Denac M.: Untersuchung der Atmungsmechanik beim Pferd
Helv. Physiol. Acta 24, C 66 - C 68 (1966)

Denac M.: Untersuchungen der Dehnbarkeit (Compliance) des Lungengewebes bei gesunden und emphysemkranken Pferden
Schweiz. Arch. Tierheilk. 112, 606-615 (1970)

Denac M.: Die funktionelle Residualkapazität und Helium-Einmischzeit gesunder und lungenkranker Pferde
Zbl. Vet. Med. A 23, 193-205 (1976)

Denac M., H. Spörri und R. Beglinger: Das Göttinger Miniaturschwein als Versuchstier, 4. Mitteilung: Atmungsparameter
Res. exp. Med. 170, 283-288 (1977)

Dirnagl K: Zur Messung des Strömungswiderstands in den Atemwegen
Zschr. Aerosol-Forschg. 2, 149-165 (1957)

Dixon W.J.: BMDP Biomedical Computer Programs
University of California Press, Los Angeles (1975)

Documenta Geigy: Wissenschaftliche Tabellen
J.R. Geigy A.G., Pharma, Basel, 7. Aufl. (1968)

Dunne H.W. and A.D. Leman: Diseases of swine
The Iowa State University Press, Ames, Iowa, 4. Aufl. (1975)

Fleisch A.: Der Pneumotachograph; ein Apparat zur Geschwindigkeitsregistrierung der Atemluft
Pflügers Arch. ges. Physiol. 209, 713-722 (1925)

Fleisch A.: Le Pneumotachographe
Helv. Physiol Acta 14, 363-368 (1956)

Fry D.L.: The physics of air flow in emphysema
Amer. Rev. Respir. Dis. 80, 123-127 (1959)

Fry D.L. and R.E. Hyatt: Pulmonary mechanics
Am. J. Med. 29, 672-689 (1960)

Furukawa R.: Lungenfunktionsprüfungen bei Ponys mit und ohne Lungenaffektionen
Inaug. Diss., Zürich (1972)

Georgiev J.: Temperaturregulation, Kreislauf und Atmung des Göttinger Miniaturschweines in verschiedenen Wachstumsstadien
Habilitationsschrift, Humboldt-Universität, Berlin (1975)

Gillespie J.R., W.S. Tyler and V.E. Eberly: Pulmonary ventilation and resistance in emphysematous and control horses
J. Appl. Physiol. 21, 416-422 (1966)

Gillespie J.R. and W.S. Tyler: Chronic alveolar emphysema in the horse
Advances in Vet. Science and Comparative Medicine 13, 59-99 (1969)

Gretener P.: Untersuchungen über die Abhängigkeit des Atemzeitquotienten von der Atemfrequenz und vom Atemzugvolumen beim Pferd
Inaug. Diss., Zürich (1975)

Gretener P.: Abhängigkeit der mittleren inspiratorischen und exspiratorischen Atemstromstärke vom Atemminutenvolumen beim Pferd
Schweiz. Arch. Tierheilk. 118, 191-202 (1976)

Häni H., A. Brändli, H. Luginbühl und H. König: Vorkommen und Bedeutung von Schweinekrankheiten: Analyse eines Sektionsguts (1971-1973), II. Krankheits- und Todesursachen in verschiedenen Altersgruppen
Schweiz. Arch. Tierheilk. 118, 1-11 (1976)

Häni H., A. Brändli, J. Nicolet, H. König und H. Luginbühl: Vorkommen und Bedeutung von Schweinekrankheiten: Analyse eines Sektionsguts (1971-1973), IV. Pathologie des Respirationstraktes
Schweiz. Arch. Tierheilk. 118, 44-57 (1976)

Hippel J.: Untersuchungen in der Praxis von Atmung, Herzfrequenz und rektal gemessener Körpertemperatur bei gesunden Zuchtebern und ihre Abhängigkeit vom Alter und Gewicht der Tiere
Inaug. Diss., Hannover (1966)

Hörnicke H.: Atmung und Gaswechsel
In: Hdb. d. Tierernährung, Bd. I, 3. Teil, S. 298-326, Verlag Paul Parey, Berlin und Hamburg (1969)

Hörr P.: Das Schwein als Versuchstier in der Humanmedizin - Eine Literaturstudie -
Inaug. Diss., Hannover (1973)

Husch H.: Verhalten der Atemgrössen von Pferden in Abhängigkeit von Gangart und Laufgeschwindigkeit
Diplomarbeit, Universität Hohenheim (1974)

Ingram D.L.: The effect of environmental temperature on body temperatures, respiratory frequency and puls rate in the young pig
Res. Vet. Sci. 5, 348-356 (1964)

Keller H.: 10 Jahre Herdensanierung mit Spezifisch-Pathogen-Freien (SPF)- Schweinen
Habilitationsschrift, Zürich (1973)

Keller H.: Bedeutung und Bekämpfung der Respirationskrankheiten des Schweines im Rahmen der Massentierhaltung
Pfizer Observanda, Nr. 5 (1974)

Kittler L., V. Dzapo und R. Wassmuth: Beitrag zur Messmethode von Atemgrössen bei Haustieren
Dtsch. Tierärztl. Wschr. 84, 352-354 (1977)

Koenig W.: Klinisch-physiologische Untersuchungsmethoden
Georg Thieme Verlag, Stuttgart (1972)

Macklem P.T., R.G. Fraser and D.V. Bates: Bronchial pressures and dimensions in health and obstructive disease
J. Appl. Physiol. 18, 699-706 (1963)

Marshall R. and A.B. Dubois: The viscous resistance of lung tissue in patients with pulmonary disease
Clin. Sci. 15, 473-483 (1957)

Mead J.: Control of respiratory frequency
J. Appl. Physiol. 15, 325-336 (1960)

Morrison S.R., T.E. Bond and H. Heitman Jr.: Skin and lung moisture loss from swine
Trans. Am Soc. Agr. Eng. 10, 691-696 (1967)

v. Neergaard K. und K. Wirz: Die Messung der Strömungswiderstände in den Atemwegen des Menschen, insbesondere bei Asthma und Emphysem
Zschr. klin. Med. 105, 51-82 (1927)

Otis A.B.: The work of breathing
Physiol. Rev. 34, 449-458 (1954)

Pattison I.H.: A histological study of a transmissible pneumonia of pigs characterised by extensive lymphoid hyperplasia
Vet. Rec. 68, 490-494 (1956)

Pride N.B., S. Permutt, R.L. Riley and B. Bromberger-Barnea: Determinants of maximal expiratory flow from the lungs
J. Appl. Physiol. 23, 646-662 (1967)

Rossier P.H. und A. Bühlmann: Dyspnoe und Atemarbeit
Schweiz. med. Wschr. 89, 543-557 (1959)

Sasse H.H.L.: Some pulmonary function tests in horses
Proefschrift, Utrecht (1971)

Scherrer M.: Die Lungenfunktionsstörung beim akuten Anfall von Asthma bronchiale
Schweiz. med. Wschr. 96, 935-938 (1966)

Scheunert-Trautmann: Lehrbuch der Veterinär-Physiologie
Paul Parey Verlag, Berlin, 6. Aufl. (1976)

Schulze W., I. Schröder und K. Arbeiter: Die Atemfrequenz beim Schwein
Dtsche. Tierärztl. Wschr. 70, 620-624 (1963)

Schulze W., U. Nobis und H. Rundfeldt: Atmung, Puls und Temperatur des Schweines nach Bewegung und die Zeitspanne bis zur Rückkehr der Ausgangswerte
Berl. Münch. Tierärztl. Wschr. 78, 450-455 (1965)

Sheldon G.P.: Significance of increased airway resistance in pulmonary emphysema
Schweiz. Z. Tuberk. 18, 140-158 (1961)

Simmons D.H. and A. Hemingway: Functional residual capacity and respiratory nitrogen excretion of dogs
J. Appl. Physiol. 8, 95-101 (1956)

Spörri H. und W. Leemann: Zur Untersuchung der Lungenmechanik bei Grosstieren
Schweiz. Arch. Tierheilk. 106, 699-714 (1964)

Spörri H. und K. Zerobin: Zur Physiologie und Methodik der Lungenfunktionsprüfung
Tierärztl. Umschau 19, 285-292 (1964)

Spörri H. und M. Denac: Lungenfunktionsprüfungen bei Grosstieren
Schweiz. Arch.Tierheilk. 109, 252-259 (1967)

Steinhardt M. und T. Studzinski: Besonderheiten und Grenzen der Kreislauf- und Atmungsfunktion des Schweines bei der Thermoregulation
Monatshefte Veterinärmed. 22, 985-992 (1967)

Veterinary Investigation Service (Ministry of Agriculture, Fisheries and Food): A survey of the incidence and causes of mortality in pigs. 1. Sow survey
Vet. Rec. 71, 777-786 (1959)

Wegmann W., H.U. Bertschinger und H. Keller: Die enzootische Pneumonie der Schweine. Eine elektronenmikroskopische Untersuchung mit Erregernachweis im Gewebe
Zbl. Vet. Med. B 16, 428-447 (1969)

Wetli U.: Vergleichende Untersuchungen bei lungenkranken Pferden
Inaug. Diss, Zürich (1972)

Wittke G.: Ansätze zu einer Atmungsphysiologie des Pferdes
Habilitationsschrift, Freie Universität Berlin (1957)

LEBENSLAUF

Am 8.7.1950 wurde ich in Zürich geboren.
Nach Besuch der Primar- und Sekundarschule in Zürich und Dübendorf trat ich in die Kantonsschule Zürich ein, wo ich 1969 das Maturitätszeugnis Typ C erwarb. Im selben Jahr immatrikulierte ich mich an der Veterinär-Medizinischen Fakultät der Universität Zürich, und im November 1974 legte ich an der Zürcher Fakultät das Staatsexamen als Tierarzt ab.
Seither bin ich als Assistent am Veterinär-Physiologischen Institut der Universität Zürich tätig.

An dieser Stelle möchte ich herzlich danken

- Herrn Prof. Dr. Dr. h.c. H. Spörri für die Ueberlassung des Themas
- Herrn Dr. E. Eggenberger für seine Hilfsbereitschaft bei der Lösung der statistischen Probleme
- den Herren J.-L. Widmer und H. Hess für das Erstellen des Rechenprogramms und die Durchführung der elektronischen Berechnung der Atmungsschleifen
- Frau S. Pletscher und Frau A. Hug für die prompte und saubere Ausführung der grafischen Darstellungen
- allen Mitarbeitern des Veterinär-Physiologischen Instituts, die zum Zustandekommen dieser Arbeit beigetragen haben.